

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

Kalil Graeff Salim

**OXIDAÇÃO PASSIVA DO METANO EM ENSAIOS DE  
COLUNA SIMULANDO CAMADAS DE COBERTURA DE  
ATERROS SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior

Florianópolis

2011

Salim, Kalil Graeff

Oxidação passiva do metano em ensaios de coluna simulando camadas de cobertura de aterros sanitários / Kalil Graeff Salim. Florianópolis: UFSC / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2011. xiv, 92 f.: il.

Orientador: Armando Borges de Castilhos Jr

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2011.

1. Aterros sanitários. 2. Biogás. 3. Bactérias metanotróficas. 4. Biorecobrimento para oxidação passiva do metano. 5. Ensaio em colunas – dissertação. I. Castilhos Jr, Armando Borges. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

**"OXIDAÇÃO PASSIVA DO METANO EM ENSAIOS DE COLUNA SIMULANDO  
CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS"**

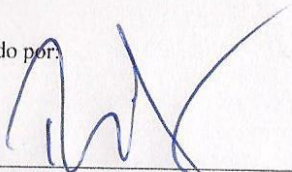
KALIL GRAEFF SALIM

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

na Área de Engenharia Ambiental.

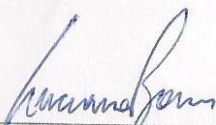
Aprovado por:



Prof. Paulo Belli Filho, Dr.



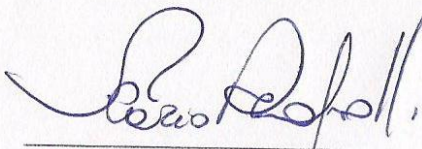
Prof. Masato Kobiyama, Dr.



Prof.<sup>a</sup>. Luciana Paulo Gomes, Dr.<sup>a</sup>.



Prof. Armando Borges de Castilhos Júnior, Dr.  
(Orientador)



Prof. Flávio Rubens Lapolli  
(coordenador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL  
JULHO/2011

Kalil Graeff Salim

**OXIDAÇÃO PASSIVA DO METANO EM ENSAIOS DE  
COLUNA SIMULANDO CAMADAS DE COBERTURA DE  
ATERROS SANITÁRIOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, 4 de julho de 2011.

---

Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof., Dr. Armando Borges de Castilhos Junior  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof. <sup>a</sup>, Dr. <sup>a</sup> Luciana Paulo Gomes  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

---

Prof., Dr. Masato Kobiyama  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof., Dr. Paulo Belli Filho  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Dedico este trabalho:  
Aos meus pais pelo apoio constante  
em todos os meus projetos,  
ao meu irmão Neif, amigo inseparável,  
e minha namorada Márcia Michele  
pelo companheirismo de sempre.



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer todos que de alguma forma apoiaram para o desenvolvimento desta pesquisa:

Primeiramente aos meus familiares pelo carinho e pela educação que me foi passada e incentivos constantes em todos os meus projetos;

A minha namorada Márcia Michele, pelo carinho, companheirismo e dedicação;

Ao professor Armando Borges de Castilhos Júnior pelas orientações, auxílios e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa;

Ao professor Alexandre Cabral e Camila Roncato pelo apoio metodológico e ensinamentos passados;

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), que proporcionaram auxílio e infra-estrutura no decorrer desta pesquisa;

Ao Edevaldo do Laboratório de Ciências Térmicas, pela confecção de minha coluna experimental;

Ao João Renato da Central de Análises da Química, pelo apoio na utilização do equipamento analítico;

Ao professor Paulo Belli e ao mestrando Wanderli pelo empréstimo do equipamento analítico utilizado nesta pesquisa;

Às bolsistas Ana e Vanessa pelo esforço e dedicação ao longo da pesquisa;

A todos os colegas do LARESO, em especial a Heloisa, Fernando, Elivete e Francisco;

A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro;

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e estiveram presente durante a realização desta pesquisa;

A todos vocês meu Muito Obrigado!!

Kalil Graeff Salim





“A educação sozinha não transforma a sociedade,  
sem ela tão pouco a sociedade muda”.

Paulo Freire



## RESUMO

As emissões antrópicas de metano preocupam quanto à possibilidade de contribuição ao efeito estufa e aquecimento global. Desta forma, os Aterros Sanitários como grandes emissores de gás metano devem possuir sistemas capazes de diminuir as emissões através da drenagem, queima e/ou aproveitamento do metano gerado. Todavia, existem emissões fugitivas que escapam pela camada de cobertura dos aterros. Por este motivo tem-se estudado diferentes alternativas para utilização de bactérias metanotróficas, contidas no material de recobrimento dos aterros, para oxidar o metano. Os Biorecobrimentos de Oxidação Passiva do Metano (BOPM) buscam reduzir as emissões de metano durante e após a vida útil de um aterro sanitário. Diante deste fato a presente pesquisa teve como objetivo analisar a taxa de oxidação do metano com diferentes substratos potenciais, simulando através de ensaios de coluna a camada de cobertura dos aterros sanitários. Os substratos utilizados foram o solo de cobertura do aterro sanitário de Biguaçu (SC, Brasil); uma mistura de solo com lodos de estações de tratamento de esgoto e água e 15%, em peso, de cal; e uma mistura de solo com lodo de estação de tratamento de esgoto e 30%, em peso, de cal. Foi inserida uma mistura gasosa de 50% CH<sub>4</sub> e 50% CO<sub>2</sub> na parte inferior da coluna e ar atmosférico na parte superior da coluna. As dimensões da coluna foram 60 cm de altura e 15 cm de largura, possuindo 5 pontos de amostragem de gás a cada 10 cm e uma saída de gases na parte superior da coluna. Foram realizados ensaios de caracterização dos substratos no início e no final dos ensaios, objetivando avaliar as alterações no pH, teor de matéria orgânica e grau de saturação. A coleta e análise das amostras foi realizada por um analisador portátil infravermelho LAM 2000. O período de análise durou de 38 a 65 dias para cada substrato e a taxa de oxidação máxima de CH<sub>4</sub> dos ensaios variou de 19,8 a 107,6 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia, representando ganhos de eficiência de oxidação entre 52,3 e 73,3%. O tipo de substrato, o aumento da oferta de CH<sub>4</sub> e ar atmosférico, além do grau de saturação foram os fatores mais susceptíveis para variar a taxa de oxidação. O substrato que apresentou o maior potencial de oxidação do CH<sub>4</sub> foi a mistura de solo com lodos de estações de tratamento de esgoto e água e 15%, em peso, de cal, com uma taxa de oxidação de 107,6 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia, demonstrando ser uma ótima opção para a utilização como biorecobrimento de aterros sanitários.

Palavras-chave: Aterros sanitários, Biogás, Bactérias metanotróficas, Biorecobrimento para oxidação passiva do metano, Ensaio em colunas

.

## ABSTRACT

Anthropogenic emissions of methane are a concern due to their possibility of contributing to the greenhouse effect and global warming. Thus, the Landfill, as the major emitters of methane, should have systems capable of reducing emissions by drainage, burning and / or use of generated methane. However, there are fugitive emissions that escape through the cover layer of the landfill. For this reason, there has been a development of studies on different alternatives for the use of methanotrophic bacteria, contained in the coating material of the landfills, to oxidize methane. The Passive Methane Oxidation Biocover (PMOB) seeks to reduce methane emissions during and after the life of a landfill. Given this fact, the present study aimed to analyze the rate of oxidation of methane with different potential substrates, simulating, through column tests, the cover layer of landfill. The used substrates were the soil of the landfill in Biguaçu (SC, Brazil); a mixture of soil and sludge from sewage and water treatment plants and 15%, in weight, of chalk; and a mixture of soil and sludge from sewage treatment plant and 30%, in weight, of chalk. Was inserted a gaseous mixture of 50% CH<sub>4</sub> and 50% CO<sub>2</sub> at the bottom of the column and atmospheric air at the top of the column. The column was 60 cm in high and 15 cm in width and had five sampling points every 10 cm high. Tests were performed to characterize the substrates at the beginning and end of the experiment, with the objective to evaluate the changes in pH, organic material content and degree of saturation. The samples collection and analysis were performed by a portable infrared analyzer LAM 2000. The observation period lasted from 38 to 65 days for each substrate and the maximum rate of CH<sub>4</sub> oxidation the tests ranged between 19.8 and 107.6 g CH<sub>4</sub> / m<sup>2</sup>.day, representing gains of oxidation efficiency between 52,3 and 73.3%. The type of substrate, the increased supply of CH<sub>4</sub> and atmospheric air, plus the degree of saturation were the factors most likely to vary the rate of oxidation. The substrate which showed the greatest potential for oxidation of CH<sub>4</sub> was the mixture of soil with sludge from sewage treatment plants and water and 15% by weight of lime, with an oxidation rate of 107.6 g CH<sub>4</sub> / m<sup>2</sup>. day, proving to be a great option for use as landfill biorecover.

**Keywords:** Landfill, Biogas, Methanotrophic bacteria, Passive Methane Oxidation Biocover, Column test



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Geração de resíduos 2008 e 2009 (ABRELPE, 2009).....	35
Figura 2– Coleta de resíduos 2008 e 2009 (ABRELPE, 2009).....	35
Figura 3– Destinação dos resíduos 2008 e 2009 (ABRELPE, 2009).....	36
Figura 4– Fontes de emissões antrópicas (adaptado de Wuebbles e Hayhoe, 2002).....	41
Figura 5 – Biorecobrimento (adaptado de Huber-Humer et al. (2008)).....	50
Figura 6 – Biofiltro (adaptado de Huber-Humer et al. (2008)).....	51
Figura 7 – Biojanelas (adaptado de Huber-Humer et al. (2008)).....	52
Figura 8 – Biomanta (adaptado de Huber-Humer et al. (2008)).....	53
Figura 9 – Coluna experimental (adaptado de Kightley <i>et al.</i> (1995)).....	56
Figura 10 – Coluna experimental (adaptado de Humer et Lechner (2001b)).....	57
Figura 11 – Coluna experimental (adaptado de Stein et al. (2001) e Wilshusen et al. (2004)).....	58
Figura 12 – Coluna experimental (adaptado de Kettunen et al. (2006)).....	59
Figura 13 – Coluna experimental (adaptado de Perdikea <i>et al.</i> (2008)).....	60
Figura 14 – Coluna experimental (adaptado de Philopoulous et al. (2009).....	61
Figura 15 – Coluna experimental de Roncato (2009).....	62
Figura 16 – Fluxograma metodológico.....	65
Figura 17 – Coluna experimental.....	70
Figura 18 – Equipamentos coluna experimental.....	71
Figura 19 – Compressor de ar, válvula de ajuste fino e pote umidificante.....	72
Figura 20 – Bolhômetro.....	72
Figura 21 – Coleta de amostras.....	74
Figura 22 – Planilha de análise de resultados.....	75
Figura 23 – Mangueira e filtro de coleta de gases.....	75
Figura 24 – Curva granulométrica Substrato 1.....	77
Figura 25 – Curva granulométrica Substrato 2.....	78
Figura 26 – Curva granulométrica Substrato 3.....	80
Figura 27 – Taxa de aplicação de CH <sub>4</sub> e O <sub>2</sub> e taxas de eficiência.....	82
Figura 28 – Taxa de aplicação e oxidação de CH <sub>4</sub> e eficiências do ensaio 1.....	82
Figura 29 – Perfil da concentração dos gases no solo (dia 53, ensaio 1).....	83
Figura 30 – Taxa de aplicação de CH <sub>4</sub> e O <sub>2</sub> e eficiências do ensaio 2.....	85
Figura 31 – Taxa de aplicação e oxidação de CH <sub>4</sub> e eficiências do ensaio 2.....	85
Figura 32 – Perfil da concentração dos gases no solo (dia 34, ensaio 2).....	86
Figura 33 – Taxa de aplicação de CH <sub>4</sub> e O <sub>2</sub> e eficiências do ensaio 3.....	87
Figura 34 – Taxa de aplicação e oxidação de CH <sub>4</sub> e eficiências do ensaio 3.....	88
Figura 35 – Perfil da concentração dos gases no solo (dia 39, ensaio 3).....	88





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição do biogás .....	40
Tabela 2– Quantificação da emissão de metano em aterros sanitários .....	42
Tabela 3– Fatores geotécnicos que afetam a emissão de biogás .....	43
Tabela 4 - Principais pesquisas realizadas .....	63
Tabela 5 – Parâmetros avaliados e normas .....	67
Tabela 6 – Parâmetros do substrato 1 .....	78
Tabela 7 – Parâmetros do substrato 2 .....	79
Tabela 8 – Parâmetros do substrato 3 .....	80
Tabela 9 – Parâmetros geotécnicos dos substratos .....	81
Tabela 10 – pH dos ensaios .....	90
Tabela 11 – Umidade dos substratos .....	91
Tabela 12 – Grau de saturação dos substratos .....	91
Tabela 13 – Teor de ar nos substratos.....	92
Tabela 14 – Teor de matéria orgânica dos substratos .....	93
Tabela 15 – Resultados finais .....	94



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BOPM	Biorecobrimento para Oxidação Passiva do Metano
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gs	Densidade relativa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LARESO	Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
M.O	Teor de matéria orgânica
Mt	Mega tonelada
NBR	Norma Brasileira
O <sub>2</sub>	Oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Santa Catarina
Sr	Grau de Saturação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina



# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVAS.....</b>	<b>25</b>
<b>1.2 OBJETIVO .....</b>	<b>27</b>
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	27
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....</b>	<b>29</b>
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .....	30
2.1.1.1. CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ORIGEM .....	30
2.1.1.2. CLASSIFICAÇÃO QUANTO AOS RISCOS POTENCIAIS .....	32
2.1.2. COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	33
2.1.3. GERAÇÃO, COLETA E DESTINAÇÃO FINAL .....	34
2.2. ATERRO SANITÁRIO .....	36
2.3. BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO.....	38
2.4. COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS.....	39
2.5. GÁS METANO.....	40
2.6. FATORES DE INFLUÊNCIA PARA A OXIDAÇÃO DO METANO .....	44
2.6.1. BACTÉRIAS METANOTRÓFICAS .....	45
2.6.2. MATÉRIA ORGÂNICA.....	46
2.6.3. GRAU DE SATURAÇÃO E POROSIDADE.....	47
2.6.4. TEMPERATURA .....	48
2.6.5. PH.....	48
2.6.6. PRESSÃO ATMOSFÉRICA.....	48
2.6.7. METAIS E $\text{NH}_4$ .....	48
2.7. TÉCNICAS EM DESENVOLVIMENTO PARA OXIDAÇÃO DO METANO EM ATERROS SANITÁRIOS.....	49
2.7.1. BIORECOBRIMENTOS (BIOCOVER) .....	50
2.7.2. BIOFILTRO (BIOFILTER) .....	50
2.7.3. BIOJANELAS (BIOWINDOW) .....	51
2.7.4. BIOMANTA (BIOTARP) .....	52
2.8. MÉTODOS DE MEDIÇÕES DAS EMISSÕES DE $\text{CH}_4$ E CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE OXIDAÇÃO .....	53
2.8.1. CÂMARA DE FLUXO .....	53
2.8.2. GÁS TRAÇADOR.....	54
2.8.3. PERFIL DE GASES.....	54
2.8.4. BALANÇO DE MASSA.....	54
2.8.5. ISÓTOPO ESTÁVEL.....	55
2.9. ESTUDOS DE OXIDAÇÃO EM COLUNAS .....	55
<b>3.MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
<b>3.1. SELEÇÃO E COLETA DE SUBSTRATOS .....</b>	<b>66</b>

<b>3.2. PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS</b>	
<b>PRELIMINARES .....</b>	<b>67</b>
<b>3.3. APARATO EXPERIMENTAL – COLUNA DE OXIDAÇÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>3.4. ANALISADOR DE GÁS .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4.1. LANDTEC - GEM 2000 .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4.2. CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4.3. MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DOS GASES.....</b>	<b>74</b>
<b>3.5. DETERMINAÇÃO DA TAXA DE OXIDAÇÃO DO METANO E</b>	
<b>EFICIÊNCIA DE OXIDAÇÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>3.5.1. BALANÇO DE MASSA DE CH<sub>4</sub> .....</b>	<b>76</b>
<b>3.5.2. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
<b><u>4.RESULTADOS .....</u></b>	<b><u>77</u></b>
<b>4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2. EFICIÊNCIA E TAXA DE OXIDAÇÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.1. ENSAIO 1 (SOLO DO ATERRO SANITÁRIO; H:40 CM; S<sub>R</sub>:46,3%) .....</b>	<b>81</b>
<b>4.2.2. ENSAIO 2 (SOLO COM O LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE</b>	
<b>ÁGUA E ESGOTO COM UM ACRÉSCIMO DE 15% DE CAL; H:40 CM; S<sub>R</sub>:40,1%).</b>	<b>84</b>
<b>4.2.3. ENSAIO 3 (SOLO COM O LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE</b>	
<b>ESGOTO COM UM ACRÉSCIMO DE 30% DE CAL; H:40 CM; S<sub>R</sub>:41,1%).</b>	<b>86</b>
<b>4.3. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO APÓS OS ENSAIOS.....</b>	<b>89</b>
<b>4.3.1. pH.....</b>	<b>89</b>
<b>4.3.2. UMIDADE.....</b>	<b>90</b>
<b>4.3.3. TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA.....</b>	<b>92</b>
<b>4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>93</b>
<b><u>5.CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u></b>	<b><u>97</u></b>
<b><u>6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u></b>	<b><u>101</u></b>
<b><u>ANEXO A – PLANILHA DE CÁLCULOS ENSAIO 1 .....</u></b>	<b><u>109</u></b>
<b><u>ANEXO B – PLANILHA DE CÁLCULOS ENSAIO 2 .....</u></b>	<b><u>111</u></b>
<b><u>ANEXO C – PLANILHA DE CÁLCULOS ENSAIO 3 .....</u></b>	<b><u>113</u></b>
<b><u>ANEXO D – CONVERSÕES .....</u></b>	<b><u>115</u></b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial passou-se a utilizar em grande escala os combustíveis fósseis, tendo como consequência das atividades humanas as emissões de gases de efeito estufa. Estes gases absorvem parte das radiações infravermelha, dificultando seu escape para o espaço e impedindo que ocorra uma perda de calor, mantendo com isso a Terra aquecida. É um fenômeno natural, porém, com as constantes emissões de gases como o metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), dentre outros, verifica-se o aumento constante da temperatura global e a geração de preocupações ao redor do mundo com relação às mudanças climáticas e impactos associados.

De acordo com estudos realizados, o poder de aquecimento do metano é 25 vezes maior que o do dióxido de carbono, sendo ele então um gás com grande potencialização de efeito estufa (IPCC, 2007). As fontes antropogênicas são as principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, dentre estas fontes estão: indústrias, agricultura, mineração, transportes, construção e habitação, estando presentes neste último item os resíduos sólidos urbanos e os esgotamentos sanitários (IPCC, 2007).

O grande crescimento populacional em todo o mundo aliado ao crescimento econômico, bem como os hábitos de consumo, tem como consequência a geração crescente de resíduos sólidos. Contudo, ainda são muito pouco aplicadas às tecnologias alternativas para a reciclagem, reutilização e valorização energética dos resíduos sólidos, sendo grande parte destes resíduos, principalmente nos países em desenvolvimento, ainda tratados de maneira incorreta, vindo a ocasionar impactos ao meio ambiente. Em contrapartida, a utilização da técnica de aterro sanitário para a disposição final dos resíduos sólidos é muito utilizada em vários países. Esta técnica prevê a disposição dos resíduos sólidos sobre um solo impermeabilizado, com drenagem de lixiviados gerados, drenagem e queima de gases, tratamento dos efluentes e camadas de cobertura dos resíduos.

É uma técnica segura, relativamente de baixo custo frente a tecnologias mais avançadas de tratamento e possui a capacidade de reduzir os possíveis impactos ambientais, quando comparado aos lixões. Os aterros sanitários são considerados grandes fontes antropogênicas de



emissões gasosas geradas através da biodegradação, em meio anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos. O biogás produzido possui de 50 a 60% de metano, 40 a 50% de dióxido de carbono e outros gases em menores proporções (Kightley *et al.*, 1995).

Estudos realizados mostram que cada tonelada de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros sanitários resulta em aproximadamente 160 a 250 m<sup>3</sup> de biogás (Humer e Lechner, 1999). Existem alguns fatores que interferem na capacidade de geração de biogás nos aterros sanitários, dentre eles estão a composição dos resíduos depositados, a umidade, o tamanho das partículas, a idade dos resíduos, o pH e a temperatura (Bogner and Spokas, 1993; Czepiel *et al.*, 1996).

No projeto e construção dos aterros sanitários, como citado anteriormente, é obrigatória a instalação dos drenos para os gases, visando drenar os gases produzidos pela decomposição dos resíduos sólidos, a fim de evitar os possíveis acúmulos localizados e perigos de incêndio. Na saída dos poços conectados aos drenos o biogás é queimado transformando o metano em dióxido de carbono, o que reduz o potencial impactante do biogás.

Contudo, existem sistemas sofisticados de co-geração de energia através do biogás que estão sendo instalados em aterros sanitários no Brasil e em outros países. É importante ressaltar que nenhum sistema de coleta de gases é 100% eficiente devido à existência de emissões fugitivas pela camada de cobertura dos aterros sanitários, comprovado através de estudos e constatações da presença de CH<sub>4</sub> na camada de cobertura dos aterros. Neste sentido estão sendo desenvolvidas pesquisas para capturar as emissões fugitivas através de sistemas bióticos, como biorecobrimentos, biofiltros e biojanelas.

Nestes sistemas ocorre a oxidação biológica do metano na camada de cobertura dos aterros sanitários, atenuando as emissões através de uma tecnologia de baixo custo, principalmente depois que os sistemas de coletas não são mais utilizados, 20 a 30 anos após fechamento do aterro sanitário (IPCC, 2007).

A oxidação biológica é realizada por bactérias metanotróficas, as quais, em meio aeróbio, oxidam o metano em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, biomassa e calor (GEBERT e GRÖNGRÖFT, 2006; HUMER e LECHNER, 2001).

No entanto, as propriedades físicas, químicas e biológicas do material de cobertura devem ser adequadas para a atividade das bactérias metanotróficas, bem como a taxa de produção e composição do biogás (HILGER e HUMER, 2003) e as variáveis climáticas como a pressão atmosférica, precipitação e temperatura que afetam também o processo de oxidação (CABRAL *et al.*, 2007).

Por outro lado existem algumas substâncias inibidoras do processo de oxidação do metano, como a presença de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3$  em concentrações elevadas (HUMER e LECHNER, 1999). Os substratos onde as bactérias metanotróficas irão atuar podem ser constituídos por resíduos de construção civil, brita, areia, resíduos industriais, minérios de ferro, solos em geral, composto, lodo de esgoto, dentre outros, criando um meio propício para a atividade das bactérias metanotróficas.

Ensaios de coluna são realizados com a intenção de estudar, em escala laboratorial, o comportamento de diferentes substratos utilizados na oxidação do metano, buscando condições relativamente semelhantes aos aterros sanitários, com a inserção de biogás e ar atmosférico em uma coluna preenchida com substrato. Nesta coluna são realizadas amostragem dos gases em diferentes pontos para verificar a eficiência da oxidação do metano nas diferentes camadas do substrato.

Neste contexto o propósito deste trabalho é estudar a eficiência da oxidação do metano em coluna piloto experimental simulando camadas de cobertura de aterro sanitário, através de substratos variados como solos e/ou resíduos gerados nas regiões próximas aos aterros onde poderão ser futuramente desenvolvidos ensaios de campo.

## 1.1 JUSTIFICATIVAS

Diante da geração crescente de resíduos sólidos em todo o mundo e da busca por soluções para redução, reutilização e reciclagem, existe ainda a responsabilidade pela disposição final ambientalmente correta dos rejeitos, onde os aterros sanitários figuram como uma das soluções mais utilizadas, com infra-estrutura necessária para o confinamento dos resíduos sólidos urbanos e controle da geração de lixiviados e biogás.

Os aterros sanitários figuram entre os maiores emissores antrópicos de metano, gás este gerado a partir da biodegradação em meio anaeróbico da fração orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos. Este biogás gerado é coletado por um sistema de drenagem de gases e tem como finalidade o controle das emissões, a redução da possibilidade de instabilidade e explosões, evitando o acúmulo de bolsões de gases no interior dos mesmos e a minimização dos impactos causados pela migração dos gases nas áreas próximas aos aterros.

Os sistemas de drenagem de gases possuem em sua saída queimadores que têm por finalidade a conversão do metano em gás carbônico, reduzindo o potencial impactante do gás emitido para a atmosfera. Em aterros mais modernos existe a coogeração de energia através do biogás, possuindo canalizações que encaminham o biogás gerado para os sistemas de conversão em energia, porém, em ambos os sistemas, aproximadamente 25% de todo o biogás gerado nos aterros sanitários escapam dos sistemas de drenagem de gases e são emitidos diretamente para a atmosfera.

Neste sentido, tem-se estudado alternativas eficientes e de baixo custo com a finalidade de oxidação das emissões fugitivas de metano pela camada de cobertura dos aterros sanitários. As camadas de cobertura têm como objetivo evitar a exposição do lixo e também a entrada excessiva de água proveniente de precipitações. Contudo, as técnicas de biorecobrimentos além de atuar como uma camada de cobertura realizam a oxidação passiva do metano, garantindo a oxidação das emissões fugitivas dos sistemas de drenagem do biogás, evitando a emissão direta do metano para a atmosfera e deixando de contribuir para o aquecimento global e impactos associados.

Através de pesquisas que buscam identificar possíveis substratos ou resíduos com potencial para oxidação do metano na camada de cobertura dos aterros sanitários, pode-se alcançar resultados satisfatórios do ponto de vista técnico e ambiental.

Portanto, a inserção desta metodologia de pesquisa vem acrescentar instrumentos às demais pesquisas relacionadas ao tema resíduos sólidos, desenvolvidos pelo Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a taxa de oxidação do metano por bactérias metanotróficas em diferentes substratos potenciais, através de ensaios de coluna, simulando as camadas de cobertura de aterros sanitários.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar substratos potenciais que proporcionem a oxidação do metano;
- Variar as condições operacionais de fluxos de entrada de gases e monitorar a atividade bacteriana na oxidação do metano;
- Analisar as características de umidade, grau de saturação, matéria orgânica e pH dos substratos antes e após os ensaios e suas interferências no processo de oxidação;



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Chamado de lixo na linguagem popular, os resíduos sólidos possuem diferentes definições. De acordo com o Dicionário da Língua Portuguesa, "lixo é tudo aquilo que não se quer mais e se joga fora; coisas inúteis, velhas e sem valor". Para o IBAM (2001), "resíduo sólido, ou simplesmente lixo, é todo material sólido ou semi-sólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta, em qualquer recipiente destinado a este ato".

Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, através da NBR 10.004/2004, que trata da Classificação dos Resíduos Sólidos, define os resíduos sólidos como: "resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível".

Esse material que se torna inútil por grande parte da população pode retornar como matéria prima para um novo produto ou processo, surgindo então à idéia de reaproveitamento, convidando a uma reflexão sobre o conceito clássico de resíduos sólidos. A geração dos resíduos sólidos pelas atividades humanas é vista como um dos principais problemas ambientais em todo o mundo, por isso é grande a preocupação com sua correta destinação final, evitando prejuízos ambientais, econômicos e sociais, evidenciando-se assim a importância de um bom gerenciamento dos mesmos.

## **2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos**

A classificação dos resíduos sólidos gerados em uma determinada atividade é o primeiro passo para estruturar um plano de gestão adequado. A partir da classificação são definidas as etapas de coleta, armazenamento, transporte, manipulação e destinação final, de acordo com cada tipo de resíduo gerado (IBAM, 2001). São várias as maneiras de se classificar os resíduos sólidos de acordo com o objetivo desejado. Pode-se classificá-los quanto a sua natureza física ou quanto à composição química, mas as mais relevantes são quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e à origem.

### **2.1.1.1. Classificação quanto à origem**

A origem é o principal elemento para a caracterização dos resíduos sólidos. Segundo este critério, o IBAM (2001) agrupa os diferentes tipos de resíduos em cinco classes principais, a saber:

- Resíduos domésticos ou residenciais: são os resíduos gerados nas atividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais.
- Resíduos comerciais: são os resíduos gerados em estabelecimentos comerciais, cujas características dependem da atividade ali desenvolvida. Nas atividades de limpeza urbana, os tipos "domésticos" e "comerciais" constituem o chamado "lixo domiciliar", que, junto com o lixo público, representa a maior parcela dos resíduos sólidos produzidos nas cidades. O grupo de lixo comercial, assim como os entulhos de obras, pode ser dividido em subgrupos chamados de "pequenos geradores" e "grandes geradores". O regulamento de limpeza urbana do município poderá definir precisamente os subgrupos de pequenos e grandes geradores. Pode-se adotar como parâmetro: Pequeno Gerador de Resíduos Comerciais é o estabelecimento que gera até 120 litros de lixo por dia. Grande Gerador de Resíduos Comerciais é o estabelecimento que gera um volume de resíduos superior a esse limite. Analogamente, pequeno gerador de entulho de obras é a pessoa física ou jurídica que gera até 1.000kg ou 50 sacos de 30 litros por dia, enquanto

grande gerador de entulho é aquele que gera um volume diário de resíduos acima disso.

- Resíduo público: são os resíduos presentes nos logradouros públicos, em geral resultantes da natureza, tais como folhas, galhadas, poeira, terra e areia, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos.
- Resíduos domiciliar especial: compreendem os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus. Observe que os entulhos de obra, também conhecidos como resíduos da construção civil, só estão enquadrados nesta categoria por causa da grande quantidade de sua geração e pela importância que sua recuperação e reciclagem vêm assumindo no cenário nacional.
- Resíduos de fontes especiais: são resíduos que, em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais em seu manuseio, acondicionamento, estocagem, transporte ou disposição final. Dentro da classe de resíduos de fontes especiais, merecem destaque:
  - Industrial: são os resíduos gerados pelas atividades industriais. São resíduos muito variados que apresentam características diversificadas, pois estas dependem do tipo de produto manufaturado. Devem, portanto, ser estudados caso a caso.
  - Radioativo: considerados os resíduos que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas ambientais. O manuseio, o acondicionamento e a disposição final do lixo radioativo no Brasil estão a cargo da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN.
  - Portos, aeroportos e terminais rodo-ferroviários: Resíduos gerados tanto nos terminais, como dentro dos navios, aviões e veículos de transporte. Os resíduos dos portos e aeroportos são decorrentes do consumo de passageiros em veículos e aeronaves e sua periculosidade está no risco de transmissão de



doenças já erradicadas no país. A transmissão também pode ocorrer através de cargas eventualmente contaminadas, tais como animais, carnes e plantas.

- Agrícola: Formado basicamente pelos restos de embalagens impregnados com pesticidas e fertilizantes químicos, utilizados na agricultura, que são perigosos. Portanto o manuseio destes resíduos segue as mesmas rotinas e utiliza-se dos mesmos recipientes e processos empregados para os resíduos industriais Classe I.
- Serviços de saúde: Compreendendo todos os resíduos gerados nas instituições destinadas à preservação da saúde da população.

#### **2.1.1.2. Classificação quanto aos riscos potenciais**

De acordo com a NBR 10.004 da ABNT, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- Classe I ou perigosos: são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.
- Classe II A ou não-inertes, não perigosos: são os resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduo Classe I ou Classe II B.
- Classe II B ou inertes, não perigosos: São aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente, e que, quando amostrados de forma representativa, segundo a norma NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou

deionizada, a temperatura ambiente, conforme teste de solubilização segundo a norma NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, conforme listagem nº 8 (Anexo H da NBR 10.004), excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

### **2.1.2. Composição dos resíduos sólidos**

As indústrias com suas novas tecnologias vêm produzindo materiais com uma grande diversidade físico-química, com baixa biodegradabilidade e vida útil, gerando resíduos muitas vezes variáveis, complexos e de difícil tratabilidade (BOHN, 2003).

As características dos resíduos sólidos urbanos estão condicionadas a diversos fatores, desde fatores climáticos, densidade populacional e condições sociais e econômicas, que influenciam a composição gravimétrica e a taxa de produção per capita (CASSINI et al., 2003). Os diferentes hábitos e costumes da população, as atividades econômicas dominantes, os padrões de vida, o clima, as estações do ano e outras condições locais contribuem para essa variação de composição, tanto qualitativamente como quantitativamente (TAKEDA, 2002).

Os RSU são constituídos basicamente por matéria orgânica putrescível, papel/papelão, podas de árvores e gramados, plástico, vidro, material metálico ferroso e não ferroso, ossos e demais tipos de resíduos muitas vezes denominados de material inerte, dependendo dos critérios de caracterização física ou gravimétrica (CASSINI et al., 2003).

A matéria orgânica tem grande representatividade quantitativa nos resíduos sólidos gerados na maioria das cidades brasileira. Em Florianópolis de acordo com a caracterização física dos resíduos sólidos urbanos, realizada pela COMCAP em 2002, apresentou uma relação de 46% em peso dos resíduos na forma de matéria orgânica.

O papel, plástico e o papelão estão também em grande quantidade nos resíduos sólidos urbanos, apresentando viabilidade de implantação de coleta seletiva. Além destes existe uma pequena parcela que é representada pelos vidros e metais (OROFINO, 2002).

Os rejeitos são constituídos pelos resíduos sanitários e pelos materiais que não possuem características para serem reciclados ou reutilizados. A sua correta separação evita o envio de materiais recicláveis juntamente para o local de disposição final, onde em alguns casos são os aterros sanitários.

### **2.1.3. Geração, coleta e destinação final**

A taxa de geração dos resíduos sólidos urbanos é a quantidade de resíduos gerada por habitante em um período de tempo especificado e que tem caráter fundamental no planejamento de coleta e destinação dos resíduos. Os fatores de geração consistem, basicamente, na taxa de geração por habitantes e no nível de atendimento dos serviços públicos do município.

A geração *per capita* pode variar conforme o tamanho das cidades segundo IBGE (2000). Em cidades com até 200 mil habitantes, os valores estão entre 0,45 e 0,70 kg/habitante.dia e nas cidades acima de 200 mil habitantes, essa quantidade aumenta para a faixa entre 0,8 e 1,2 kg/habitante.dia.

Segundo dados da ABRELPE (2009) a geração de RSU no Brasil intensificou-se no ano de 2009, quando a produção total chegou a aproximadamente 57 milhões de toneladas, conforme pode ser observado na Figura 1.

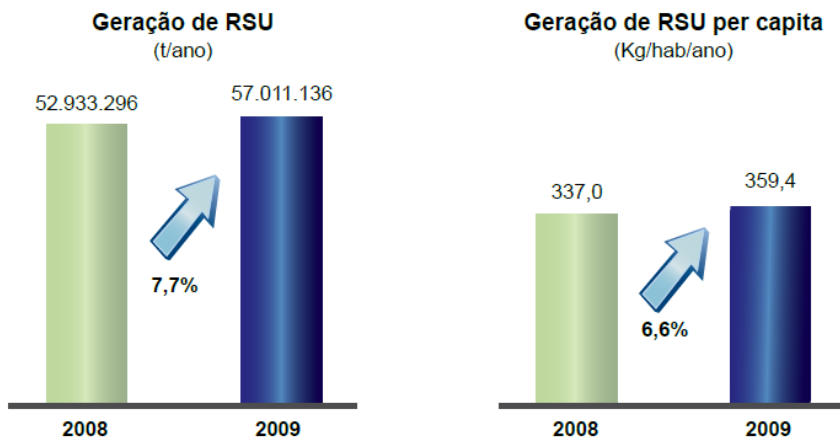


Figura 1- Geração de resíduos 2008 e 2009 (ABRELPE, 2009)

A comparação destes dados de geração com a quantidade de resíduos coletados indicada na Figura 2 mostra que quase 7 milhões de toneladas de RSU deixaram de ser coletadas e, certamente, tiveram destino impróprio (ABRELPE, 2009).

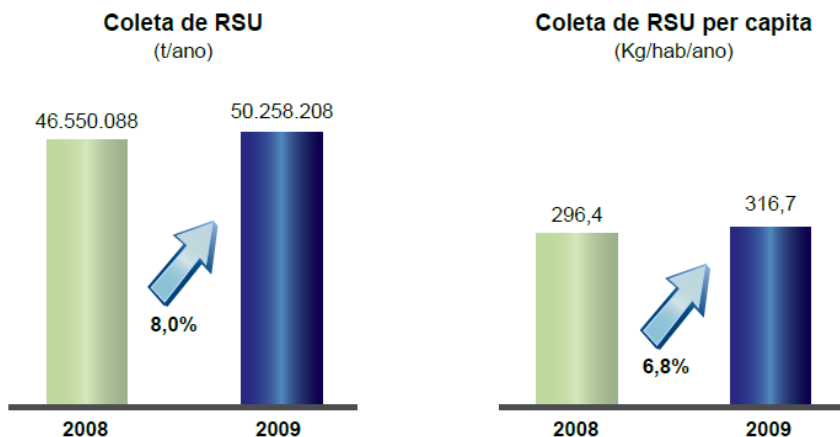


Figura 2– Coleta de resíduos 2008 e 2009 (ABRELPE, 2009)

Com relação à destinação dos resíduos sólidos no Brasil (Figura 3), aproximadamente 57% dos resíduos são destinados corretamente em aterros sanitários, enquanto que 43% do total ainda estão sendo dispostos em locais inadequados, como os lixões, evidenciando a problemática e os possíveis impactos ambientais (poluição do solo, da água e do ar), sociais (existência de catadores), econômicos (desvalorização do uso do solo local e vizinho) e de saúde pública (contaminações por vias diretas e indiretas).

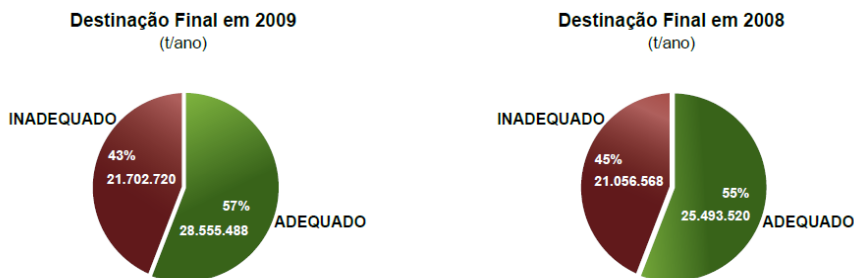


Figura 3– Destinação dos resíduos 2008 e 2009 (ABRELPE, 2009)

## 2.2. ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário é uma técnica de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. É um método que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (NBR 8419). Um aterro sanitário deve possuir impermeabilização de base, sistema de drenagem de lixiviados, reduzindo as pressões atuantes dos líquidos na massa de resíduos e minimizando o potencial de migração do mesmo no subsolo, sendo o líquido conduzido para tratamento antes de ser lançado em corpos d'água.

Igualmente, um aterro sanitário deve dispor de sistema de drenagem dos gases provenientes da decomposição da matéria orgânica

resultante do processo de digestão dos resíduos sólidos, evitando acúmulos de gases e perigos de incêndio. Além disso, a drenagem dos gases garante a estabilidade física do maciço de resíduos. Os drenos verticais geralmente são construídos em secção cilíndrica de brita envolta por telas e os drenos horizontais são construídos associados aos drenos verticais e facilitam a drenagem dos gases pela massa de resíduo, podendo ser interligados ao sistema de drenagem de lixiviados (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). O tratamento do biogás poderá ocorrer através da queima diretamente nos drenos verticais ou ainda pode ser coletado e direcionado para sistemas centralizados de queimadores ou aproveitamento energético.

Para proteger a superfície das células de lixo são projetados sistemas de cobertura, buscando minimizar os impactos ambientais, diminuir a presença de vetores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, redução de maus odores, impedir catadores, eliminação da queima dos resíduos e a saída descontrolada dos gases. O sistema de cobertura deve ser resistente a processos erosivos, sendo recomendado o uso de proteção vegetal (IPT, 1995).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305) define como disposição final ambientalmente adequada a distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Segundo a NBR 13896 “Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e Operação” são fixadas as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas. Entretanto, não existe um padrão definido de como se deve construir um sistema de cobertura final em um aterro de resíduos sólidos, utilizando comumente o que ditam as normas NBR 8419 (ABNT, 1992) e NBR 13896 (ABNT, 1997).

## 2.3. BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

Nos aterros sanitários a conversão biológica da matéria orgânica é a principal responsável pela degradação dos resíduos, resultando na geração de gás (biogás) e no carregamento de moléculas diversas pela água da chuva (lixiviado) (CASTILHOS JR et al., 2003). Os resíduos depositados em aterros sanitários sofrem decomposição na forma aeróbia, enquanto há presença de oxigênio e após a cessão de ar ocorre a decomposição anaeróbia.

A biodegradação aeróbia é iniciada durante a deposição dos resíduos nos aterros perdurando até certo período após a colocação da camada de cobertura, enquanto houver presença de oxigênio. Na etapa aeróbia predominam fungos, *streptomices* e bactérias fotossintéticas (CASTILHOS JR et al., 2003).

Contudo, o restante da degradação se dá sob ambiente anaeróbio. Os consórcios microbianos presentes em sistemas anaeróbios de aterramento de resíduos são responsáveis pela sequência das etapas de degradação: hidrólise de polímeros, fermentação de ácidos orgânicos e mineralização final dos resíduos com a etapa de metanogênese (CASTILHOS JR et al., 2003).

A origem do biogás de aterro sanitário ocorre por biodegradação dos resíduos depositados e em 4 fases, descritas a seguir.

A fase I, exclusivamente aeróbia, existe a presença de oxigênio. Essa etapa se inicia imediatamente após deposição dos resíduos e ocorre enquanto houver presença de  $O_2$ . Água, nitritos e sais de ferro formam os produtos finais dessa etapa (CASTILHOS JR et AL. 2003). Após a cessão de oxigênio ocorre a decomposição anaeróbia, que formam as etapas seguintes. Período de 1 a 6 meses.

Nas fases II e III, fases ácidas, a concentração de  $CO_2$  representa a maior parte dos gases gerados no aterro devido aos processos acidogênicos e acetogênicos, que resultam na formação de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. Park et al. (2001) afirma que a primeira reação química que ocorre durante a degradação da matéria orgânica depositada, transforma essa massa em diversos produtos intermediários como compostos orgânicos voláteis e alcoóis.

Período de 3 meses a 3 anos. Ao final da terceira etapa, metanogênica instável, a população das bactérias metanogênicas começa a se proliferar e crescer, com o início da geração de  $\text{CH}_4$ .

A quarta fase do processo, onde há predominância de organismos anaeróbios metanogênicos, ocorre à formação do gás metano com produtos finais formados principalmente por ácidos acéticos e dióxido de carbono; essa fase, caracterizada por ser a mais longa pode durar até 40 anos (ESMAP, 2004).

Castilhos Jr. et al. (2003) consideram que embora essa divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos e seus impactos sobre as emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas. Isto ocorre na medida em que sempre há o aterramento de resíduos sólidos novos, causando grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro sanitário.

## 2.4. COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

O biogás de aterro sanitário é constituído de vários gases e possui uma relação direta com a característica do resíduo depositado. O gás metano e o dióxido de carbono são os principais constituintes desses compostos e os demais elementos encontrados não devem ser desprezados, apesar de representar uma pequena parcela do composto total, pois podem ser tóxicos e apresentar riscos à saúde pública (MCBEAN, ROVERS, FARQUAR, 1995).

A pequena diferença existente entre a concentração de gás metano e dióxido de carbono encontrada no biogás se deve à dissolução de parte do  $\text{CO}_2$  na fração aquosa da massa de resíduos (GUNNERSON; STUCKEY, 1986). Os valores típicos de seus constituintes e suas concentrações citados por diversos autores são apresentados na Tabela 1 a seguir.



**Tabela 1– Composição do biogás**

Referência	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	45 - 60	40 - 60	2 - 5	0,1 - 1,0
2	45 - 58	35 - 45	<1 - 20	<1 - 5
3	50 - 70	30 - 50	-	-
4	65	35	-	-
5	55 - 65	35 - 45	-	-
6	45 - 60	35 - 50	-	-

(1) Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993); (2) Qian, Koerner e Gray (2002); (3) Mcbean, Rovers e Farquar (1995); (4) Ritzkowski e Stegmann (2007); (5) Christensen et al. (1996); (6) Gandolla et al. (1997)

## 2.5. GÁS METANO

Segundo o IPCC (2007) o metano é um importante gás de efeito estufa, sendo a sua contribuição para o aquecimento global estimada em 18% e com poder de aquecimento global 25 vezes maior que o gás carbônico. É o principal componente do gás natural e está presente nos combustíveis hidrocarbonetos, na agricultura e em processos anaeróbios de tratamento de efluentes e decomposição de resíduos. Com a revolução industrial, as emissões antrópicas globais de gases de efeito estufa foram aumentando significativamente, chegando-se a valores próximos de 70%, porém, a contribuição exata de cada fonte não está bem definida (IPCC, 2007).

O aumento das emissões antrópicas de gases de efeito estufa pode ter sido o provável fator responsável pelo aumento das temperaturas médias globais, com repercussões evidentes também em outros parâmetros climáticos, incluindo o aquecimento dos oceanos, padrões de vento, temperaturas médias continentais e alcance de valores extremos de temperaturas (IPCC, 2007).

Dentre as principais fontes de metano estão às zonas úmidas, plantações de arroz, gado ruminante, tratamento de águas residuárias, produção e consumo de combustíveis fósseis, queima de biomassa e aterros sanitários (BARLAZ et al., 2004). Além de zonas úmidas, as fontes de CH<sub>4</sub> mencionados são quase todas de origem antrópicas e são

responsáveis por aproximadamente 70% das emissões globais anuais de  $\text{CH}_4$ . O aterro sanitário é a terceira maior fonte de emissão antrópica de  $\text{CH}_4$ , com 17% das emissões globais (Figura 4) (WUEBBLES E HAYHOE, 2002).

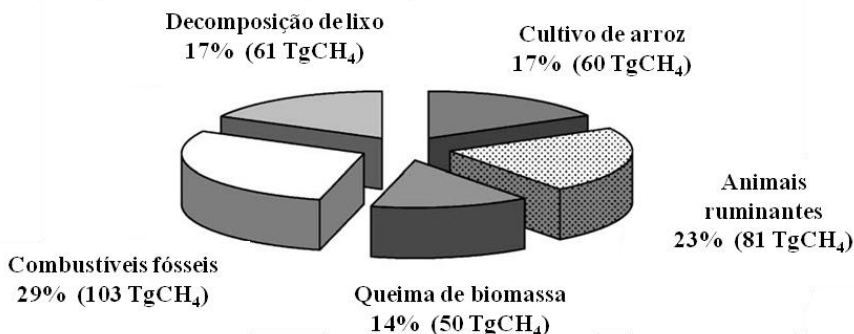


Figura 4— Fontes de emissões antrópicas (adaptado de Wuebbles e Hayhoe, 2002).

O gás proveniente de aterros é gerado através da decomposição anaeróbica da matéria orgânica e contém cerca de 50% a 60% de metano (IPCC, 2007). Humer e Lechner (1999) estimaram um potencial específico de geração de metano da ordem de 80 a 120  $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{t RSU}$  úmidos (resíduos sólidos urbanos úmidos). Além disso, estes autores estimam que para um aterro sanitário em funcionamento e com 20 m de espessura, o fator de emissão de  $\text{CH}_4$  é de aproximadamente 242 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$  para os 10 primeiros anos de funcionamento do aterro.

Através da separação da fração orgânica realizada por meio de coletas seletivas, as emissões de  $\text{CH}_4$  são em torno de 85-115 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$ . Para cada tonelada de resíduos sólidos urbanos úmido (RSUúmidos) sem pré-tratamento, estima-se que cerca de 200  $\text{m}^3$  de biogás seja formado. Considerando-se que 60% do volume de biogás é composto por metano, tem como resultado um potencial específico de geração de aproximadamente 120  $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{t RSU}$ úmidos (BAHR et al., 2006).

Na Tabela 2 são apresentados alguns estudos onde foi quantificada a geração de metano de acordo com as fontes de geração, a

carga emitida por área e a referência bibliográfica que se refere cada um dos dados.

**Tabela 2– Quantificação da emissão de metano em aterros sanitários**

FONTE DE METANO	CARGA POR ÁREA (litro de CH <sub>4</sub> /m <sup>2</sup> .dia)	REFERÊNCIA
Aterro em funcionamento nos primeiros 10 anos com 20 m de profundidade	340	Hummer e Lechner, (1997)
Resíduo restante após a separação do resíduo orgânico, nos primeiros 10 – 15 anos, 20 m de profundidade	120 - 160	Hummer e Lechner, (1997)
Resíduo tratado através de processo mecânico e biológico, 20 m de profundidade	< 25	Hummer e Lechner, (1997)
Resíduo tratado através de processo mecânico e biológico	72	Fricke <i>et al.</i> (1997)
Áreas abandonadas após 10 – 15 anos	90 - 110	Hummer e Lechner, (1997)
Lixão doméstico	400	Kightley e Nedwell (1994)

Fonte: adaptado de Bahr *et al.* (2006)

Segundo Maciel (2003) existem fatores geotécnicos que influenciam a emissão de biogás nos aterros sanitários, conforme podem ser observados na Tabela 3.

**Tabela 3– Fatores geotécnicos que afetam a emissão de biogás**

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	POSSÍVEIS EFEITOS NAS EMISSÕES DE GASES PARA A ATMOSFERA
Tipo de solo	Solos de granulometria fina (argilas) são preferidos para controle das emissões (menor permeabilidade e maior retenção de umidade).
Espessura	Quanto maior a espessura da camada, maior a possibilidade de retenção física, química e biológica dos gases.
Umidade/Saturação	A presença de água nos vazios do solo reduz o fluxo dos gases. Redução drástica para valores acima de 75% de saturação.
Conteúdo volumétrico de ar	Quanto maior a presença de poros aerados na matriz, mais rápida é a velocidade dos gases no meio, consequentemente maiores as emissões.
Densidade/Compactação	O aumento da densidade dificulta a passagem dos gases (menor porosidade e permeabilidade) minimizando as emissões.
Sucção	Importante relação com a retenção/absorção da umidade na camada, especialmente nas camadas evapotranspirativas.
Temperatura	A elevação da temperatura do solo favorece as emissões dos gases.

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	POSSÍVEIS EFEITOS NAS EMISSÕES DE GASES PARA A ATMOSFERA
Coeficiente de permeabilidade	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional as emissões de gases.
Coeficiente de difusão	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional ao fluxo de gás emitido.
Contração, expansão e fissuras	Ciclos de umedecimentos/secagem favorecem o aparecimento de fissuras em solos argilosos, aumentando os níveis de emissão.
Mineralogia	Possíveis reações físico-químicas dos minerais do solo com os gases podem retê-los na cobertura.

Fonte: Maciel (2003)

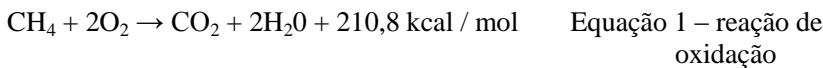
## 2.6. FATORES DE INFLUÊNCIA PARA A OXIDAÇÃO DO METANO

A camada de cobertura de um aterro sanitário tem como funções o controle de infiltrações e também a redução de emissões de biogás através do Biorecobrimento de Oxidação Passiva do Metano (BOPM). Para esta camada de oxidação cumprir suas funções é necessário considerar certas características, particularmente no que diz respeito aos parâmetros geotécnicos, materiais de cobertura do solo e da água utilizada.

A oxidação do  $\text{CH}_4$  realizada por bactérias metanotróficas ocorre naturalmente em solos e aterros sanitários e podem ser promovidos por meio da otimização de parâmetros ambientais e físicos (EINOLA et al., 2008). A capacidade de oxidação do  $\text{CH}_4$  depende das

propriedades físicas do material de cobertura, com destaque para a porosidade, a qual afeta o coeficiente de difusão de gás (HILGER E HUMER, 2003, HILGER et al. 2000a; KETTUNEN et al. de 2006), disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (HILGER E HUMER, 2003) e as taxas de produção de  $\text{CH}_4$ .

Além das propriedades físicas, depende também de variáveis climáticas, tais como a pressão atmosférica, a qual afeta o fluxo de advecção e entrada de  $\text{O}_2$ , a precipitação, a qual afeta o teor de água, influenciando o conteúdo de ar e temperatura, que afeta não apenas a distribuição de gás, mas principalmente a atividade microbiana (CABRAL et al, 2007; CZEPIEL et al, 1996; EINOLA et al, 2008; HILGER E HUMER, 2003). O grau de saturação de água é um dos parâmetros mais importantes para a oxidação do  $\text{CH}_4$  devido à influência de espaço disponível para a circulação de gás (CABRAL et al., 2008). A reação de oxidação do metano é dada pela Equação 1.



### 2.6.1. Bactérias metanotróficas

As bactérias metanotróficas estão presentes naturalmente em muitos ecossistemas onde existe a presença de metano e são particularmente abundantes nas regiões de interface de zonas úmida aeróbia e anaeróbia, arrozais e pântanos. Foram encontradas em abundância na camada de cobertura de aterros sanitários (GEBERT et al. 2003b; HUBER-HUMER et al., 2008). As bactérias metanotróficas são classificadas em dois tipos principais: tipo I e II.

Segundo Christophersen et al. (2000), as bactérias do tipo I são aquelas encontradas em locais onde a concentração de  $\text{CH}_4$  é baixa e a concentração de  $\text{O}_2$  é elevada (quase 21%). A taxa de oxidação máxima alcançável pelas bactérias do tipo I é limitada pela quantidade de  $\text{CH}_4$  no ambiente. Por outro lado as bactérias do tipo II são favorecidas quando a concentração de  $\text{CH}_4$  é alta e a concentração de  $\text{O}_2$  é baixa. Todas as bactérias metanotróficas necessitam de  $\text{O}_2$  como reagente

inicial na oxidação do metano, por isso todas estas bactérias são aeróbias.

Os microorganismos capazes de oxidar o metano são chamados de bactérias metilotróficas obrigatórias (metanotróficas) e são encontradas em quase todos os locais terrestres, marinhos e limnológicos. A enzima monooxigenase está presente em todos os microorganismos metanotróficos possibilitando a oxidação do metano, onde ocorre a fixação das moléculas de oxigênio (HUMER; LECHNER, 1999).

As bactérias metanotróficas consomem o metano convertendo-o em água, dióxido de carbono e biomassa celular. Os microorganismos em questão podem ser divididos em dois grupos fisiológicos: tipo I (*Methylomonas*, *Methylocaldum*, *Methylosphaera*, *Methylomicrobium* e *Methylobacter*) e tipo II (*Methylocystis* e *Methylosinus*) (TEIXEIRA, 2009).

As quantidades de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre podem limitar o crescimento das bactérias metanotróficas, sendo que estas absorvem o nitrogênio na forma de nitrato ou amônia. Estes microorganismos são sensíveis a determinados fatores, como pH, temperatura e teor de umidade (BAHR, 2006).

As bactérias metanotróficas podem sobreviver a um período de privação de  $\text{CH}_4$  e retomar a atividade uma vez que a taxa de fluxo de  $\text{CH}_4$  se torna suficientemente elevada. Gebert et al. (2003b) observaram esse fenômeno em seus biofiltros. Após uma interrupção de 25 semanas de biogás, o reinício do sistema de abastecimento alcançou taxas de oxidação obtidas antes da interrupção da alimentação.

### **2.6.2. Matéria orgânica**

Relativamente com o aumento da matéria orgânica (MO) do solo aumenta também a atividade oxidativa. Humer e Lechner (1999) relataram que a adição de lodo de esgoto em uma areia grossa aumentou a taxa de oxidação do solo em 26%. Além de fornecer nutriente para as bactérias metanotróficas, um solo rico em matéria orgânica tem uma maior porosidade. Testes de oxidação de um composto maduro e bem

estruturado demonstraram uma elevada capacidade de oxidação de  $\text{CH}_4$  (HUMER e LECHNER, 1999, WILSHUSEN et al., 2004).

### **2.6.3. Grau de saturação e porosidade**

Segundo Cabral et al. (2008) o grau de saturação de água ( $S_r$ ), ou a relação entre o volume de água e o volume de vazios é o parâmetro geotécnico que melhor expressa a importância do conteúdo de água no biorecobrimento de oxidação passiva do metano (BOPM) pois indica a disponibilidade de espaço para a migração de gás. A permeabilidade do solo para o ar aumenta quando o teor de água no solo é baixo, existindo mais vazios e fazendo com que o gás migre mais facilmente.

O teor de água muito alto pode reduzir o transporte do gás do solo, porque a difusão molecular na água é de cerca de 100 vezes mais lenta que no ar (CABRAL et al., 2004). Quando o grau de saturação de água é maior que 85% resulta em uma redução do fluxo de gás, limitando assim a oxidação de  $\text{CH}_4$  (CABRAL et al., 2004). No entanto, segundo Humer e Lechner (1999), se o grau de saturação cai abaixo de 13%, as bactérias metanotróficas tornam-se inativas.

Assim, o tempo de residência de  $\text{CH}_4$  na camada e sua disponibilidade para os microorganismos são fortemente influenciados pelo teor de água. Segundo Humer e Lechner (1999) o grau ótimo de saturação para a oxidação é entre 40 e 80% (teor de umidade entre 25 e 50%). Hilger e Humer (2003) observaram que a atividade máxima das metanotróficas ocorreu em um teor de água igual a 45%.

Com relação à porosidade ela afeta diretamente a penetração de  $\text{O}_2$  e a migração ascendente de  $\text{CH}_4$ . Este parâmetro é fortemente influenciado pela compactação do solo. Humer e Lechner (1999) observaram que os solos com porosidade adequada apresentam taxas de oxidação mais elevadas. Segundo Stern et al. (2007) o conteúdo do ar, que pode ser calculado a partir do grau de saturação e densidade relativa ( $G_s$ ), afeta diretamente a profundidade de penetração de  $\text{O}_2$  e o tempo de retenção de  $\text{CH}_4$  no BOPM, resultando em alterações na eficiência de oxidação do metano.



#### **2.6.4. Temperatura**

A temperatura no BOPM tem um impacto sobre reações biológicas, como a oxidação biológica de  $\text{CH}_4$  por bactérias metanotróficas. Assim, a atividade é baixa com temperaturas menores de  $5^\circ\text{C}$  e significativa acima de  $20^\circ\text{C}$  (CZEPIEL et al., 1996). A atividade metanotrófica atinge seu ideal próximo dos  $30^\circ\text{C}$ . No entanto, se a temperatura for superior a  $45^\circ\text{C}$ , a atividade bacteriana é inibida. De Visscher et al. (2001) mostraram que a influência da temperatura sobre a atividade das metanotróficas é pronunciado quando a concentração de  $\text{CH}_4$  é maior.

#### **2.6.5. pH**

Segundo Scheutz e Kjeldsen (2004) o pH ótimo para a oxidação do  $\text{CH}_4$  e para o crescimento das bactérias metanotróficas é de neutralidade (6,5 - 7,5). Figueroa (1993) relatou um pH ótimo na faixa de 5,5 a 8,5. Hilger et al. (2000b) e Humer e Lechner (1999) relataram que é possível ter a oxidação nos substratos com pH entre 4 e 9.

#### **2.6.6. Pressão atmosférica**

Variações na pressão atmosférica afetam o fluxo de  $\text{O}_2$  no BOPM, especialmente se o substrato for muito poroso (GEBERT e GRÖNGRÖFT, 2006a). O aumento da pressão atmosférica provoca a entrada de  $\text{O}_2$  no BOPM e promove a oxidação do  $\text{CH}_4$ . O fenômeno oposto ocorre quando diminui a pressão atmosférica.

#### **2.6.7. Metais e $\text{NH}_4$**

Alguns estudos têm sido conduzidos para determinar a influência dos metais a partir da oxidação do metano. Segundo Knapp et al. (2007) há uma forte correlação entre a ecologia das metanotróficas e o nível de cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) do substrato, pois estas bactérias necessitam de

cobre para apoiar a enzima mais eficiente na oxidação do metano (partícula monooxigenase). Mohanty et al. (2000) concluiu que o cromo (Cr) impediu significativamente a oxidação do  $\text{CH}_4$  em solos aluviais com um grau de saturação de 60%, enquanto o cobre tem impulsionado o processo e zinco (Zn) não tenha afetado a oxidação.

Para um solo saturado, zinco e cromo têm impedido uma oxidação significativa do  $\text{CH}_4$  e o cobre não afetou a oxidação. Segundo Scheutz e Kjeldsen (2004), a presença de cobre (Cu) deve estar presente em alta concentração (inibição inicial de 60 ppm e inibição total de 850 ppm) para inibir a atividade oxidativa das bactérias metanotróficas.

Segundo Bender e Conrad (1995) o  $\text{NH}_4$  também parece ter uma influência sobre a oxidação do  $\text{CH}_4$ , argumentando que baixas concentrações de  $\text{NH}_4$  podem estimular a oxidação, mas que esta substância é um inibidor em concentrações mais elevadas. Segundo esses autores, o  $\text{NH}_4$  é reconhecido como uma importante fonte de nitrogênio (N) para as bactérias metanotróficas. Scheutz e Kjeldsen (2004) obtiveram um efeito inibitório da adição de 14 ppm  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Humer e Lechner (1999) relataram que a adição de 25 ppm  $\text{NH}_4\text{Cl}$  levou a percentagens de inibição variando entre 78 e 89%.

## 2.7. TÉCNICAS EM DESENVOLVIMENTO PARA OXIDAÇÃO DO METANO EM ATERROS SANITÁRIOS

Em um aterro sanitário o solo utilizado para a cobertura diária e para cobertura final (geralmente argila com baixa permeabilidade ao ar) não oferecem condições ótimas para o desenvolvimento de bactérias metanotróficas e consequentemente oxidação do  $\text{CH}_4$  (PHILOPOULOS et al., 2008). Contudo é possível desenvolver sistemas baseados em processos biológicos para aperfeiçoar a oxidação, proporcionando condições favoráveis para o desenvolvimento de bactérias metanotróficas.

Estes sistemas são conhecidos como biorecobrimento, biofiltro, biojanelas, biomanta e podem ser usados para oxidar as emissões fugitivas de  $\text{CH}_4$  dos sistemas de drenagem do biogás. Além disso, podem ser utilizadas nos aterros antigos, após o seu período de produção máxima de biogás ou em locais pequenos, onde o sistema de

extração de gás não é técnica ou economicamente viável. Quando o potencial de geração de biogás de resíduos é baixo, de modo que a recuperação do gás não é viável, é recomendado o uso desses sistemas (HUBER-HUMER et al., 2008).

### 2.7.1. Biorecobrimentos (Biocover)

A cobertura final de aterros que maximizam as condições ambientais para o crescimento e atividade de bactérias metanotróficas são frequentemente chamados de biocover ou biorecobrimentos. Os resultados de Huber-Humer et al. (2008) mostram que a capacidade de oxidação mais elevada dos biorecobrimentos está geralmente associada com substratos compostos de material grosseiro, poroso e bem estruturado, que são ricos em matéria orgânica. Abaixo é mostrado um esquema do sistema de biorecobrimento (Figura 5).

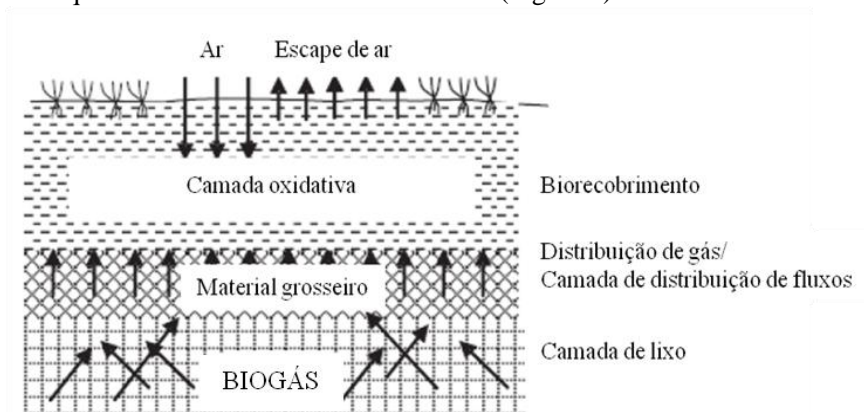


Figura 5 – Biorecobrimento (adaptado de Huber-Humer et al. (2008))

### 2.7.2. Biofiltro (Biofilter)

O biofiltro é um processo natural de degradação aeróbia dos poluentes do ar por oxidação bacteriana. Em um biofiltro, os microorganismos são fixos em um material filtrante (turfa, adubo, madeira, etc.), promovendo o crescimento de bactérias metanotróficas e

oxidação do metano. Os biofiltros necessitam da inserção de gás ativo ou passivo para abastecer o substrato e é particularmente apropriada em casos em que o sistema de extração de biogás não está mais em uso, ou quando a sua aplicação não é economicamente viável (HUBER-HUMER et al., 2008). Como os biorecobrimentos, os biofiltros deverão apresentar um substrato de alta porosidade e com boas condições ambientais para os microorganismos.

Além disso, recomenda-se aplicar os biofiltros em grande escala. A seguir é mostrado um esquema do sistema de biofiltro (Figura 6).

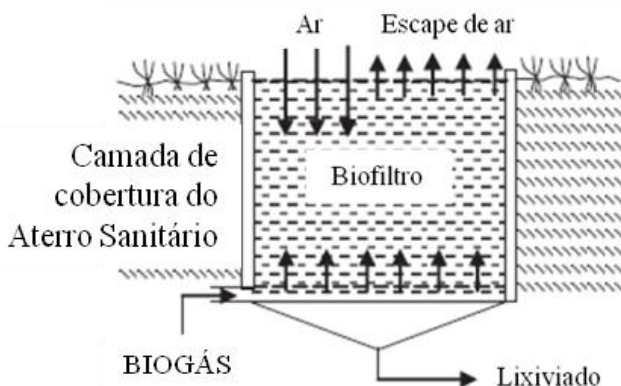


Figura 6 – Biofiltro (adaptado de Huber-Humer et al. (2008))

### 2.7.3. Biojanelas (Biowindow)

Ao contrário dos biorecobrimentos que se destinam a cobrir a totalidade ou parte do aterro, as biojanelas abrangem áreas menores em um aterro sanitário. Esta tecnologia é útil quando a implementação de um biorecobrimento em todo o aterro não é economicamente viável e quando nenhum sistema de coleta de gás pode ser conectado a um biofiltro. Nas biojanelas geralmente é utilizado composto como substrato e está diretamente integrado com a camada de cobertura do aterro, como mostrado na Figura 7. Ao contrário dos biofiltros, as biojanelas não estão contidas em uma estrutura rígida.

O biogás é alimentado diretamente pela camada de resíduos. O biogás migra naturalmente através da biojanela porque a permeabilidade do substrato é maior do que o solo da camada de cobertura dos aterros. A implantação de uma biojanela pode ser adequada quando as emissões de metano de superfície são baixas, ou seja, para gerenciar as emissões fugitivas de metano quando elas são bastante baixa ou quando a disponibilidade de substrato é limitada (HUBER-HUMER et al., 2008).

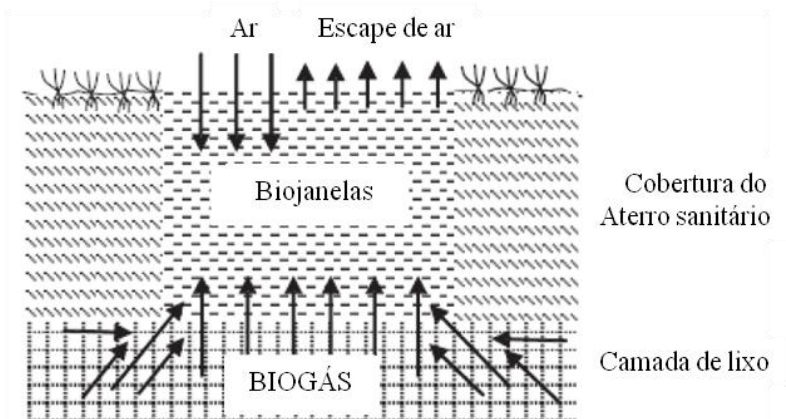


Figura 7 – Biojanelas (adaptado de Huber-Humer et al. (2008))

#### 2.7.4. Biomanta (Biotarp)

Os sistemas de biorecobrimento, biofiltros e biojanelas geralmente são aplicados durante o encerramento do aterro, ou seja, na cobertura final. No entanto, o metano é produzido durante a vida útil das células, uma vez que logo após a colocação dos resíduos, condições anaeróbias irão promover as reações bioquímicas que levam à geração de metano. Devido a este problema, a biomanta visa eliminar  $\text{CH}_4$  durante a vida útil das células de aterro.

O conceito é baseado em uma lona com a presença de metanotróficas e como acontece com outras técnicas, a saturação e porosidade são parâmetros importantes. Além disso, a magnitude da superfície da biomanta para o crescimento bacteriano e densidade da folha também são importantes (HILGER et al., 2007). A Biomanta

(Figura 8) é destinada a cobrir os resíduos no final de cada dia, reduzindo as emissões de metano gerado pela decomposição dos resíduos e é removido para permitir a adição de mais resíduos (HUBER-HUMER et al., 2008).

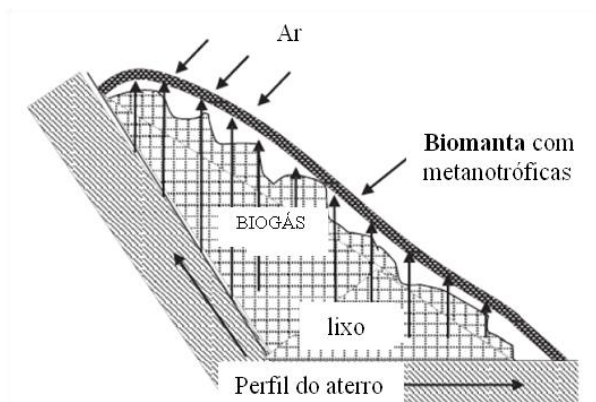


Figura 8 – Biomanta (adaptado de Huber-Humer et al. (2008))

## 2.8. MÉTODOS DE MEDIÇÕES DAS EMISSÕES DE $\text{CH}_4$ E CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE OXIDAÇÃO

Existem diversos métodos para medir o fluxo de metano nos aterros sanitários e a taxa de oxidação do metano. A seguir serão apresentadas algumas destas técnicas.

### 2.8.1. Câmara de fluxo

A técnica de câmara estática é a mais usada em aterros. Ela mede o fluxo difusivo baseado em mudanças na concentração na câmara em relação ao tempo. Esta é a única técnica que pode medir os fluxos positivos e negativos, sendo capaz de medir o fluxo mesmo muito baixo em função do analisador de gás utilizado. Seu uso é simples e adaptável às limitações de área. As desvantagens desta técnica é que ela deve usar uma abordagem geoestatística para integrar os pontos de

medições de fluxo de toda a superfície e causar modificações na superfície do solo durante a implantação (ASKRI, 2008).

### **2.8.2. Gás traçador**

O método de gás traçador é usado para quantificar as emissões de  $\text{CH}_4$  provenientes de aterros. Esta técnica permite monitorar o progresso do gás em condições reais, baseando-se na liberação de um gás traçador inerte ( $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{SF}_6$ ), a uma taxa conhecida e medições simultâneas de concentração de  $\text{CH}_4$ . Então, a taxa de emissão de  $\text{CH}_4$  pode ser determinada a partir da pluma do marcador  $\text{CH}_4$ /gás em relação ao vento. As desvantagens desta técnica é que ela não é aplicável para topografia altamente variável e a ventos com altas velocidades. Além disso, os marcadores de gás são utilizados nas emissões de gases de efeito estufa e os cálculos necessários para analisar os resultados são complexos (SCHEUTZ et al., 2009).

### **2.8.3. Perfil de gases**

Para este método as concentrações em porcentagem de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{O}_2$  são medidas em diferentes profundidades. Indicações qualitativas para a localização do horizonte de oxidação pode ser deduzida a partir de medições do perfil de gases, como por exemplo, o declínio na concentração de  $\text{O}_2$  e  $\text{CH}_4$ , ou um forte aumento na proporção de  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  e acúmulo de nitrogênio na fase gasosa (HUBER-HUMER et al., 2009).

### **2.8.4. Balanço de massa**

Este método é baseado nos fluxos de entrada e de saída ( $\text{g/m}^2.\text{s}$ ) de metano em aterros. A percentagem de metano oxidado é calculado através da equação 2.

$$F_0 (\%) = 1 - (\text{fluxo de entrada/fluxo de saída})$$

Equação 2 – balanço de massa

Para determinar o fluxo de entrada nos aterros são utilizados modelos semi-empíricos, diferente de ensaios de laboratório onde o fluxo pode ser medido através de equipamentos.

#### **2.8.5. Isótopo estável**

O gás metano tem dois isótopos de carbono,  $C_{12}$  e  $C_{13}$ . As bactérias metanotróficas consomem preferencialmente o isótopo mais leve de carbono ( $C_{12}$ ), permanecendo o gás residual enriquecido em  $C_{13}$ . Uma vez que as concentrações de isótopos de gás e estimativa da preferência das bactérias para o isótopo mais leve são obtidos, é possível calcular a taxa de oxidação entre a área de produção de biogás e zona de oxidação (CHANTON et al., 1999). O método de isótopos estáveis do carbono é um método que requer equipamentos caros e mão de obra qualificada. Também é considerado um dos mais confiáveis para o cálculo da oxidação (BÖRJESSON et al. 2001; CHANTON e LIPTAY, 2000; HUBER-HUMER et al., 2009).

### **2.9. ESTUDOS DE OXIDAÇÃO EM COLUNAS**

Os estudos de oxidação em colunas foram realizados por diversos autores a fim de investigar a capacidade de certos substratos para desenvolver uma comunidade metanotrófica, simulando um biorecobrimento de aterro sanitário com a entrada de biogás na parte inferior e ar atmosférico na parte superior. Tendo por objetivo estudar a influência de alguns parâmetros sobre a oxidação do  $CH_4$  e a análise do material como substrato, entre outros. A seguir estão descritos alguns destes estudos.

- Kightley *et al.* (1995)

Neste experimento foram construídas três colunas de 100 cm de altura e um diâmetro de 15 cm de PVC com 9 pontos de amostragem de gás a cada 10 centímetro (Figura 9). A parte inferior da coluna foi alimentada com o  $CH_4$  puro (100%), com uma vazão de 5 ml/min, no topo da coluna foi inserido ar atmosférico a uma vazão de 300 ml/min. Três substratos foram utilizados: areia grossa, um solo de cobertura de



aterro e areia. A temperatura foi tomada e as características mais conhecidas são o pH, tamanho das partículas, teor de umidade e porosidade. A taxa de oxidação máxima atingida foi de 166 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$  para a areia grossa.

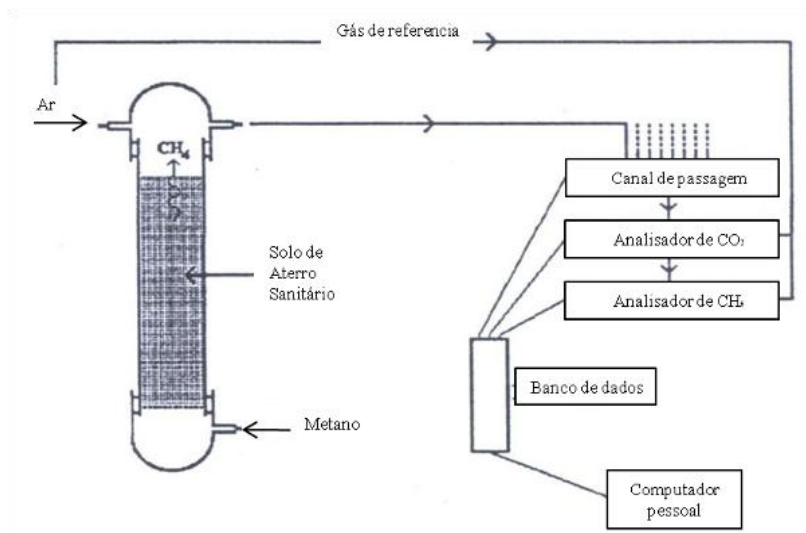


Figura 9 – Coluna experimental (adaptado de Kightley *et al.* (1995))

- De Visscher *et al.* (1999)

Neste experimento foi construída uma coluna de acrílico de 60 cm de altura e 14,1 cm de diâmetro, permitindo a coleta de amostras de gás a cada 10 cm. Além disso, a parte inferior da coluna foi alimentada regularmente com uma mistura de 50/50 de  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ , cuja vazão foi de 7 ml/min e na parte superior da coluna foi inserido ar atmosférico a uma taxa de 1 l/min. Dois substratos foram utilizados, um solo agrícola e um solo retirado de um aterro sanitário. As características mais conhecidas são o tamanho das partículas, a percentagem de matéria orgânica, pH, densidade de massa seca e umidade. A taxa de oxidação máxima foi de 198 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$  para o solo retirado de um aterro sanitário.

- Humer et Lechner (2001b)

Foi realizado testes de laboratório com uma coluna de 70 cm de altura. As amostras de gases e medições de temperatura foram feitas a 10, 30 e 50 cm (Figura 10). A coluna teve uma fonte de metano a uma vazão entre 3 e 9 ml/min e foi introduzido no fundo da coluna. Os substratos testados nesta coluna foram: compostagem de lodo de esgoto, composto de resíduos sólidos e solo de cobertura de aterro sanitário. A taxa de oxidação máxima foi de 107 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia.

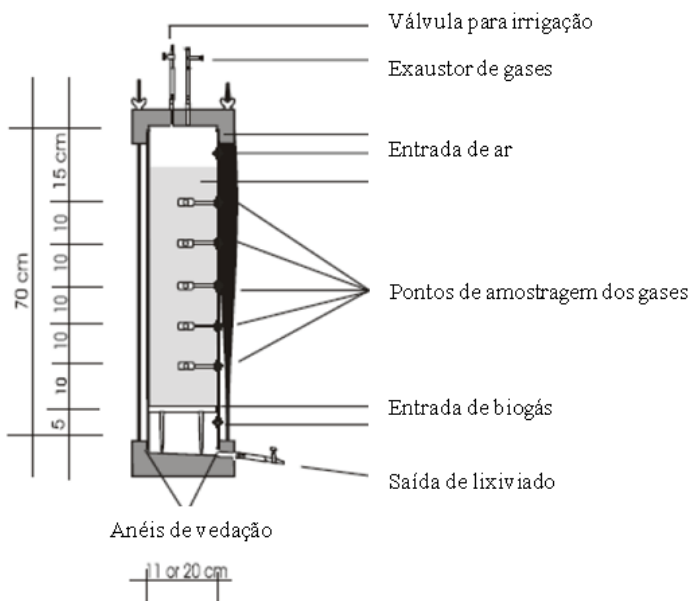


Figura 10 – Coluna experimental (adaptado de Humer et Lechner (2001b))

- Stein *et al.* (2001)

Neste experimento foi construída uma coluna de acrílico de 100 cm de altura, com pontos de amostragem de gás a cada 10 cm (Figura 11). A parte inferior da coluna foi alimentada com CH<sub>4</sub> com uma vazão de 5 ml/min e na parte superior da coluna foi inserido ar atmosférico a uma taxa de 300 ml/min. A altura do substrato foi de 80 cm e o substrato estudado foi retirado de um aterro sanitário. As características

mais conhecidas são a densidade seca, a densidade, permeabilidade do material e a umidade. A taxa máxima de oxidação foi de 99 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$ .

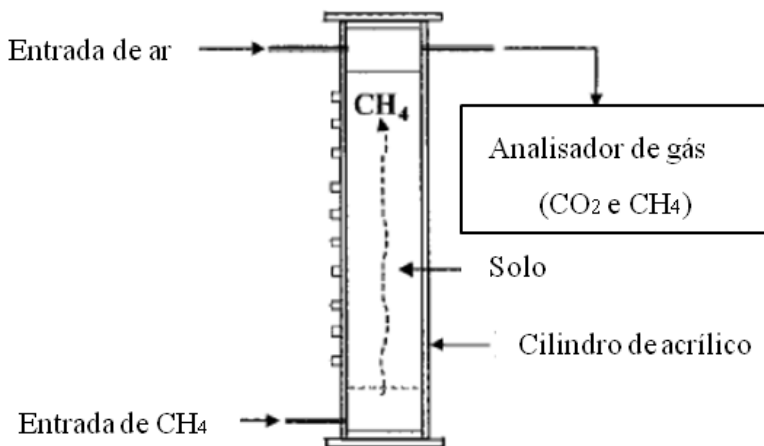


Figura 11 – Coluna experimental (adaptado de Stein et al. (2001) e Wilshusen et al. (2004))

- Wilshusen *et al.* (2004)

Neste experimento foram construídas seis colunas de acrílico com 100 centímetros de altura e 14 cm de diâmetro com pontos de amostragem de gases a cada 5 cm. A parte inferior da coluna foi alimentada com  $\text{CH}_4$  puro, a uma vazão que variou entre 7,5 e 8 ml/min e no topo da coluna foi inserido ar atmosférico. Quatro substratos foram testados: Composto de folhagem, de jardim, de serragem de madeira e composto de RSU. A taxa de oxidação máxima foi de 400 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$  para o substrato de composto de folhas. As características mais conhecidas são o percentual de matéria orgânica e umidade. O diagrama da mesma coluna é mostrado na Figura 11.

- Kettunen *et al.* (2006)

Foram construídas duas colunas de PVC com 50 cm de altura e 30 cm de diâmetro. As amostras de gás foram feitas a cada 10

centímetros. A parte inferior da coluna foi alimentada com gás 50/50  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ , a uma vazão que variava entre 4 e 6 ml/min.

Dois substratos foram testados, SDS (composto de lodo de esgoto maduro, compostagem de resíduos sólidos e areia) e DRS (composto de lodo de esgoto maduro, compostagem de resíduos sólidos e cascas). A altura do substrato foi 30 cm. As características mais conhecidas foram o tamanho das partículas, a percentagem de matéria orgânica, pH, densidade seca e teor de umidade. A taxa de oxidação máxima foi de 32 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2\cdot\text{dia}$  para a SDS. O padrão de duas colunas é apresentado na Figura 12.

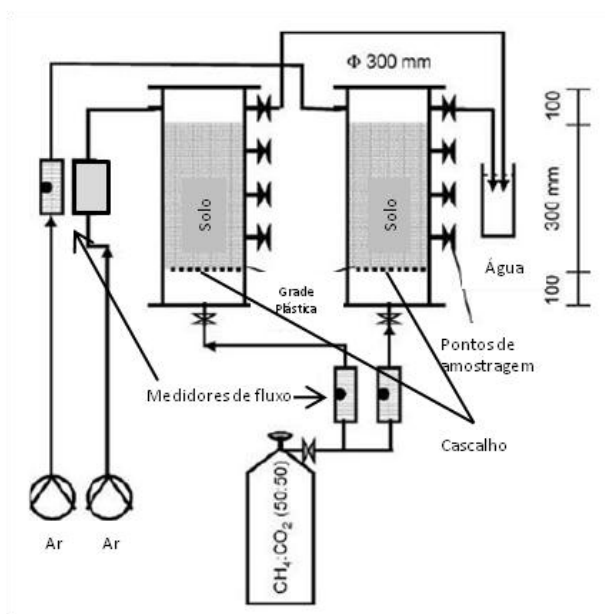


Figura 12 – Coluna experimental (adaptado de Kettunen et al. (2006))

- Perdikea *et al.* (2008)

Neste experimento foram realizados testes com seis colunas de acrílico de 124 cm de altura e 14 cm de diâmetro (Figura 13). Uma camada de cascalho foi colocada na parte inferior da coluna para a distribuição homogênea de gás ( $\text{CH}_4$  puro) a uma vazão de 3,5 ml/min. As amostras de gases e medições de temperatura e pressão foram feitas

a cada 10 cm. Duas alturas de substrato foram estudadas, 15 e 30 cm e os substratos testados foram misturas de composto e lascas de madeira. As características mais conhecidas foram a porcentagem de matéria orgânica, pH e umidade. A taxa de oxidação máxima foi de 50 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$ .

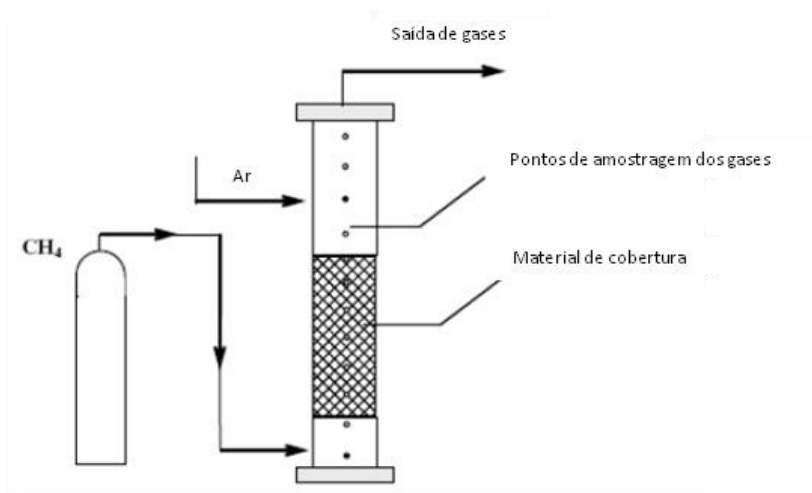


Figura 13 – Coluna experimental (adaptado de Perdikea *et al.* (2008))

- Einola *et al.* (2008)

Neste experimento foram construídas duas colunas de PVC com 50 cm de altura e 30 cm de diâmetro. As amostras de gás foram feitas a cada 10 cm. A parte inferior da coluna foi alimentada com gás 50/50  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  a uma vazão que variou entre 2 e 5,5 ml/min. O substrato testado foi o RSU pré-tratados mecânica e biologicamente. A altura do substrato foi de 30 cm. As características mais conhecidas foram a porcentagem de matéria orgânica e inorgânica, o pH e teor de umidade. A taxa de oxidação máxima foi de 82 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$ .

- Philopoulos *et al.* (2009)

Foram construídas duas colunas de aço com 182 centímetros de altura e 55 cm de diâmetro (Figura 14). Para assegurar uma adequada

distribuição de biogás foram colocados 32cm de cascalho na base da coluna. Pontos de amostragem de gás foram instalados a 5 cm, 25 cm, 45 cm, 65 cm, 85 cm e 105 centímetros. A parte inferior da coluna foi alimentada com biogás (60/40  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ ) com uma vazão de 60 ml/min (134  $\text{CH}_4$  g/m<sup>2</sup>/d). O headspace da coluna foi alimentado com ar a uma taxa de 400 mL/min. Os substratos estudados foram o composto de jardinagem e uma mistura de areia, composto e perlite. A altura do substrato foi de 125 cm. A taxa de oxidação máxima atingida foi de 134 g  $\text{CH}_4$ /m<sup>2</sup>.dia para o dois substratos estudados.

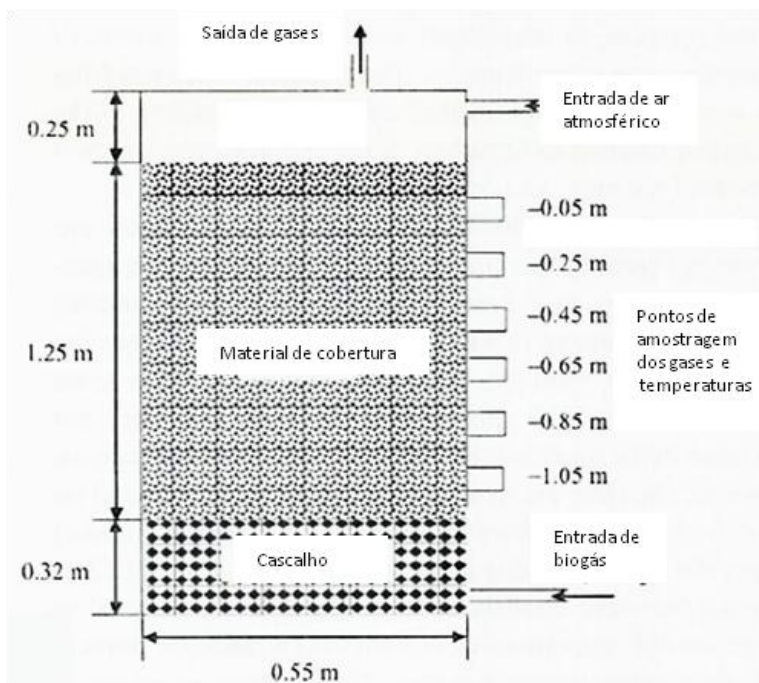


Figura 14 – Coluna experimental (adaptado de Philopoulos et al. (2009))

- Roncato (2009)

Foram construídas 2 colunas de acrílico com 15 cm de diâmetro e 70 cm de altura, possuindo pontos de amostragem a cada 10 cm (Figura 15). Foram realizados 10 ensaios, variando o tipo de substrato, a altura e o grau de saturação de cada um. Os substratos utilizados foram um composto arenoso retirado de um BOPM do Aterro Sanitário de

Saint-Nicéphore, um composto arenoso com cascalhos de outra BOPM do Aterro Sanitário de Saint-Nicéphore e um solo contaminado com metais. A taxa de oxidação máxima de ensaios de coluna variou entre 49 e 141  $\text{CH}_4$  g/m<sup>2</sup>.dia, representando ganhos de eficiência de 81 e 90% respectivamente.



Figura 15 – Coluna experimental de Roncato (2009)

Diante de todas estas pesquisas identificou-se que existem alguns fatores responsáveis pelas diferenças entre a taxa de oxidação do metano, dentre eles o grau de saturação de água, o fluxo de  $\text{CH}_4$ , o substrato utilizado e a porosidade do mesmo. Conforme o grau de saturação aumenta, os poros se enchem de água e sobram menos poros para o fluxo livre de  $\text{O}_2$  e, portanto, faz com que a taxa de oxidação se reduza. Na Tabela 4 estão ilustrados alguns dos experimentos já realizados em escala piloto, suas características e resultados alcançados.

**Tabela 4 - Principais pesquisas realizadas**

VAZÃO DE CH <sub>4</sub> (ml/min)	ALTURA DO SUBSTRATO (cm)	TIPO DO SUBSTRATO UTILIZADO NO ENSAIO	TAXA DE OXIDAÇÃO MÁXIMA (g <sub>CH<sub>4</sub></sub> m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
5	100	Areia grossa, argila para recobrimento de aterro e areia fina	165,6	Kightley et al., 1995
3 – 9	60	Composto de lodo de esgoto, de RSU e solo de recobrimento de aterro sanitário	108	Humer e Lechner, 2001
5	80	Solo retirado de um aterro sanitário	98,4	Stein et al., 2001
7	50	Solo de agricultura e solo retirado de aterro sanitário	199,2	De Visscher et al., 1999
60	125	Composto de jardinagem e uma mistura de areia, composto e perlite	133,92	Philopoulos et al 2008
7,5 – 8	100	Composto de folhagem, de jardim, de serragem de madeira e composto de RSU	400,8	Wilshusen et al., 2004



**Tabela 4 - Principais pesquisas realizadas (continuação)**

VAZÃO DE CH <sub>4</sub> (ml/min)	ALTURA DO SUBSTRATO (cm)	TIPO DO SUBSTRATO UTILIZADO NO ENSAIO	TAXA DE OXIDAÇÃO MÁXIMA (g <sub>CH4</sub> m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
2 - 5,5	30	RSU pré-tratados mecânica e biologicamente	81,6	Einola et al., 2008
4 – 6	30	SDS (lodo de esgoto maduro composto, compostagem de resíduos sólidos e areia) e DRS (lodo de esgoto maduro composto, compostagem de resíduos sólidos e cascas)	32,16	Kettunen et coll., 2006
3,5	15 e 30	Composto e aparas de madeiras	49,92	Perdikea et coll., 2008
0,2 – 3,0	30, 40 e 45	Composto arenoso retirado de um BOPM de Aterro Sanitário; Composto arenoso com cascalhos de outra BOPM de Aterro Sanitário; Solo contaminado com metais	140,88	Roncato, 2009

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 16 descreve, sob forma de fluxograma, os principais passos da metodologia da pesquisa:

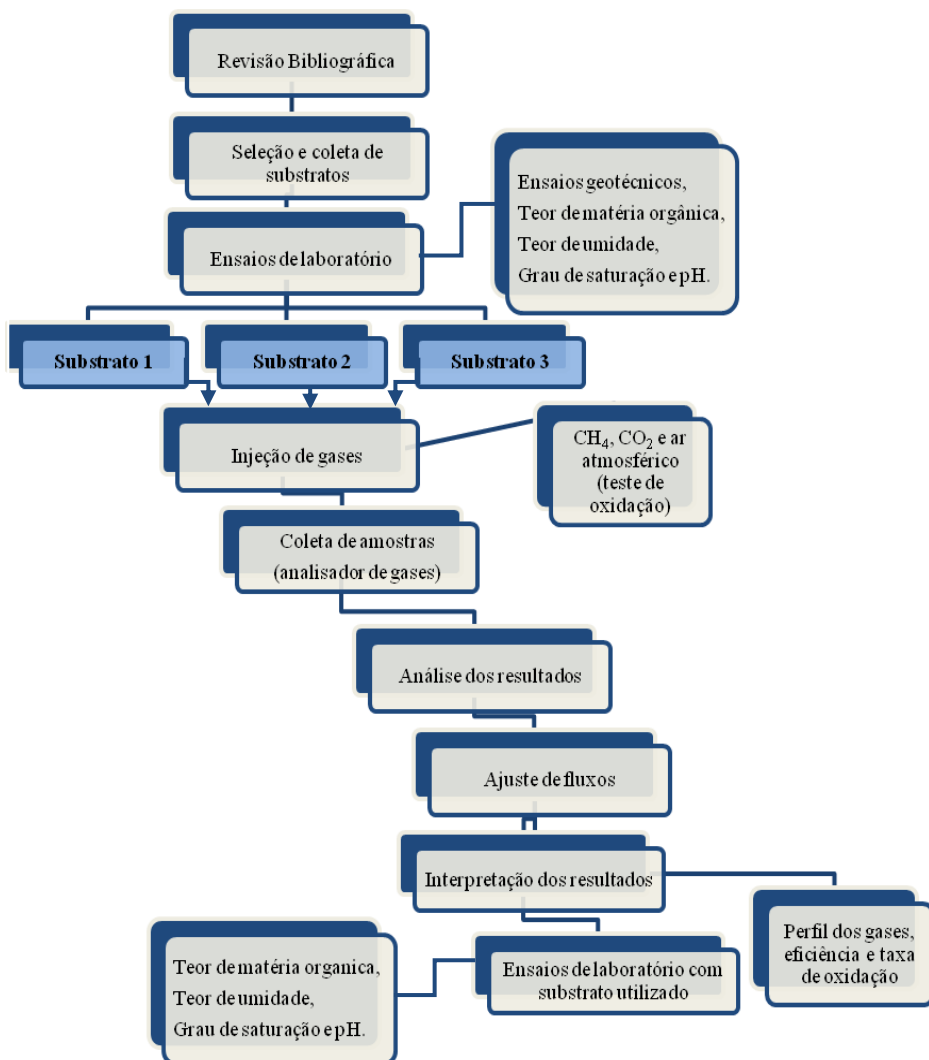


Figura 16 – Fluxograma metodológico

### 3.1. SELEÇÃO E COLETA DE SUBSTRATOS

Os substratos foram escolhidos conforme a sua eficácia na oxidação do metano, comprovada em pesquisas já publicadas, a disponibilidade dos substratos próximos aos aterros sanitários, a interação entre os projetos desenvolvidos no LARESO e a viabilidade técnica envolvida. Para a pesquisa foram utilizados 3 substratos, detalhados a seguir:

- Substrato 1 - Solo de cobertura de Aterro Sanitário: Foi realizada uma coleta em campo do solo utilizado como cobertura no Aterro Sanitário de Biguaçu, SC, onde o mesmo é retirado de uma jazida próxima as instalações do aterro.
- Substrato 2 - AE 15 (solo com o lodo de estação de tratamento de água e esgoto com um acréscimo de 15% de cal): Este substrato já é utilizado em experimentos no LARESO, por Prim (2008) como camada de cobertura de aterro sanitário e neste sentido objetivou-se detectar a sua capacidade de oxidação do metano. Possui 50 % em peso seco do solo já utilizado como camada de cobertura do Aterro Sanitário de Biguaçu e 50%, em peso seco, de uma mistura em iguais quantidades de lodos de uma estação de tratamento de esgoto pelo processo de lodos ativados e lodo de uma estação de tratamento de água convencional com o acréscimo de 15% de cal, em peso seco desta mistura, com a finalidade de estabilização do lodo.
- Substrato 3 - E30 (solo com o lodo de estação de tratamento de esgoto com um acréscimo de 30% de cal): Este substrato também é utilizado em experimentos no LARESO como camada de cobertura de aterro sanitário e neste sentido objetivou-se detectar a sua capacidade de oxidação do metano. Possui 50 % em peso seco do solo já utilizado como camada de cobertura do Aterro Sanitário de Biguaçu e 50%, em peso seco, da mistura de lodo de uma estação de tratamento de esgoto pelo processo de lodos ativados com o acréscimo de 30% de cal, em peso seco desta mistura, com a finalidade de estabilização do lodo.

### 3.2. PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS PRELIMINARES

Para a obtenção da mistura dos lodos e cal referente ao substrato 2 foram coletados os lodos no leito de secagem das estações. Para o caso do lodo referente ao substrato 3 foram coletados após as prensas desaguadoras na estação. Após as coletas todos os lodos foram encaminhados ao processo de estabilização alcalina em estufa agrícola com estabilização química com cal virgem (CaO).

A mistura do lodo com a cal foi promovida com o auxílio de um misturador forçado de eixo horizontal com capacidade útil de 110 L durante tempo suficiente para obter um material completamente homogêneo e sem torrões – aproximadamente 10 minutos. Uma balança comum com capacidade de 200 Kg foi utilizada para quantificar a massa de lodo e de cal para as misturas.

Foram realizados ensaios geotécnicos em cada um dos substratos utilizados nesta pesquisa no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, obedecendo às normas e critérios estabelecidos pela ABNT. Os tipos de ensaios estão demonstrados na Tabela 5 e foram realizados somente antes da inserção de cada substrato na coluna experimental.

**Tabela 5 – Parâmetros avaliados e normas**

ENSAIO	NORMAS
Análise Granulométrica	NBR 7181/1984
Limite de Liquidez	NBR 6459/1984
Limite de Plasticidade	NBR 7180/1984
Massa Específica dos grãos	NBR 6508/1984
Compactação	NBR 7182/1986

Realizaram-se ensaios do teor de umidade, matéria orgânica, grau de saturação e pH dos substratos antes e após os testes de oxidação para determinar as condições iniciais dos testes e possibilitar comparações com as amostras retiradas após o experimento. Estes ensaios foram realizados no Laboratório Integrado de Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

O pH foi medido com um pHmetro da marca HACH e determinado usando uma suspensão de 10 g do substrato em 50 ml de água destilada. O substrato foi misturado com a água destilada, a qual passou por um processo de fervura e esfriamento, e foram medidos após 3 horas da mistura.

O teor de umidade foi determinado a partir de uma quantidade conhecida de substrato submetido a uma temperatura de 105°C em estufa por 24 horas. Após este período o substrato foi novamente pesado e através da relação entre peso úmido e seco se determinou a umidade de cada amostra. Os resultados estão expressos como uma percentagem de voláteis ou voláteis g / g de solo seco, sendo todos os ensaios realizados em triplicata.

As análises de umidade foram realizadas antes da utilização do substrato na coluna e após os ensaios. Para as análises após os ensaios foram divididos os substratos em porções representativas a cada 10 cm da coluna, para assim determinar o perfil de umidade da mesma.

O teor de matéria orgânica foi determinado pelo calor de combustão, onde as amostras foram calcinadas a uma temperatura de 550°C durante 3 horas. Os resultados estão expressos como uma percentagem de voláteis ou voláteis g / g de solo seco, sendo todos os ensaios realizados em triplicata. As análises do teor de matéria orgânica foram realizadas antes da utilização do substrato na coluna e após os ensaios. Para as análises após os ensaios foram divididos os substratos em porções representativas a cada 10 cm da coluna, para assim determinar o perfil de matéria orgânica da mesma.

### 3.3. APARATO EXPERIMENTAL – COLUNA DE OXIDAÇÃO

Os ensaios de coluna foram realizados na área de experimentação do Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos (LARESO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e foram utilizados para medir a eficiência de diferentes substratos na taxa oxidação de metano. Os substratos foram inseridos de maneira sequencial e compactados a cada 2 cm, com o tempo de análise variando de 38 a 65 dias, conforme a adaptação e atividade das bactérias metanotróficas.

O ensaio com o substrato 1 foi realizado nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, o período do substrato 2 foi de março a abril e para o substrato 3 foi de abril a maio.

A coluna foi construída com uma configuração semelhante às encontradas na literatura, com 15 cm de diâmetro e 60 cm de altura, sendo 40 cm de altura útil, construída em PVC. Possui ainda acoplado a coluna um cilindro de biogás (50% CH<sub>4</sub> / 50% CO<sub>2</sub>), válvulas de ajuste fino, medidores de fluxos, pote umidificante e compressor de ar (Figura 17). A coluna tem as seguintes características:

- Entrada de gases na parte inferior da coluna (50% CH<sub>4</sub> / 50% CO<sub>2</sub>);
- Suporte perfurado para apoiar o substrato e distribuir uniformemente o gás de entrada;
- 5 pontos de amostragem em diferentes profundidades (a cada 10 cm);
- Entrada de ar atmosférico na parte superior da coluna;
- Saída de gases na parte superior da coluna;



Figura 17 – Coluna experimental

O fluxo do gás (50%  $\text{CH}_4$ /50%  $\text{CO}_2$ ) de entrada foi regulado através de reguladores de pressão (manômetro) e válvulas de ajuste fino, sendo o valor de fluxo medido com precisão através de um rotâmetro (Microflowmeter, marca Gilmont) conforme pode ser observado na Figura 18, passando na sequência por um recipiente umidificador antes de entrar na coluna.

Os fluxos de  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  e ar atmosférico foram aumentados gradualmente para uma melhor adaptação das bactérias a fim de alcançar maiores taxas de oxidação.

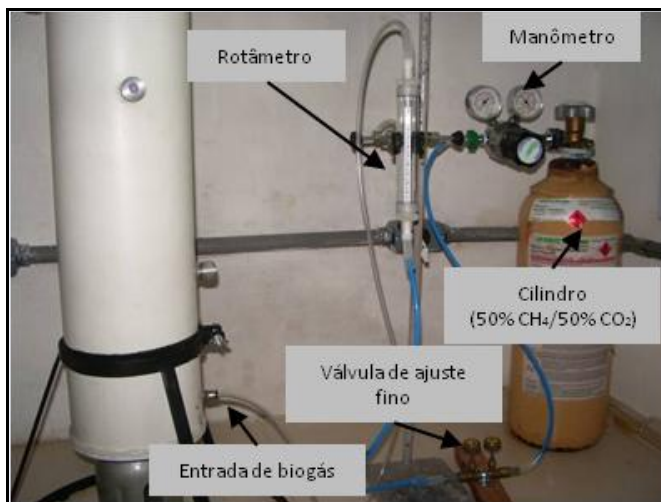


Figura 18 – Equipamentos coluna experimental

O ar atmosférico foi bombeado através de um pequeno compressor de ar, sendo em seguida regulado seu fluxo através de uma válvula de ajuste fino, passando na seqüência por um recipiente umidificador antes da medição do fluxo e da entrada na coluna (Figura 19). Para medir o fluxo do ar atmosférico foi utilizado um bolhômetro (Figura 20) onde os fluxos foram determinados através dos cálculos do diâmetro interno (1,44 cm), altura (2,5 cm) e o tempo gasto pela bolha, resultando em uma vazão expressa em ml/min.



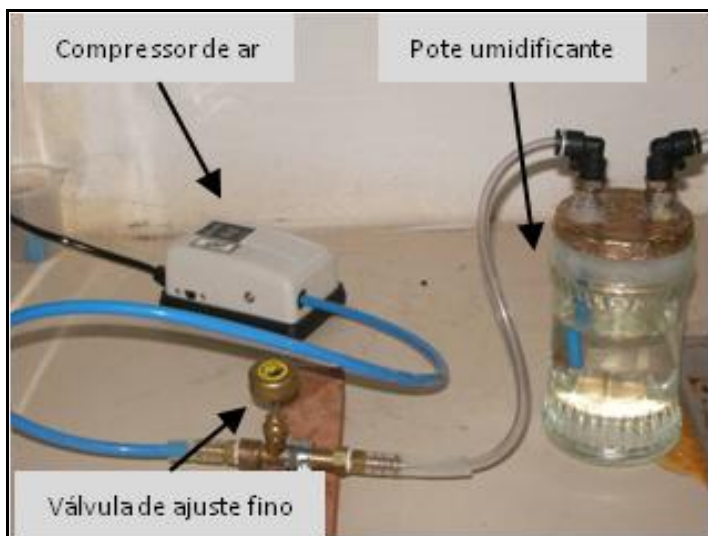


Figura 19 – Compressor de ar, válvula de ajuste fino e pote umidificante



Figura 20 – Bolhômetro

### 3.4. ANALISADOR DE GÁS

#### 3.4.1. LANDTEC - GEM 2000

O analisador de gás infravermelho GEM 2000 foi projetado pela LANDTEC para uso específico em aterros sanitários para monitoramento de sistemas de extração de gás, tochas e sistemas de controle de migração de aterros sanitários. O instrumento colhe amostras e analisa o conteúdo de metano, dióxido de carbono, oxigênio e o balanço de nitrogênio contido no gás de aterros sanitários (LANDTEC, 2005). A leitura de metano é filtrada por uma frequência de absorção infravermelha de  $3,41\mu\text{m}$  (nominal), que é a frequência específica para cadeias de hidrocarbonetos. A leitura de dióxido de carbono é filtrada por uma frequência de absorção infravermelha de  $4,29\mu\text{m}$  (nominal), que é a frequência específica para dióxido de carbono.

Portanto, quaisquer outros gases geralmente encontrados em aterros sanitários não afetarão a leitura do dióxido de carbono (LANDTEC, 2005). O sensor de oxigênio é de um tipo de célula galvânica recentemente desenvolvida que praticamente não sofre influência de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2$ , diferentemente de muitos outros tipos de célula de oxigênio (LANDTEC, 2005). Não há “contaminação” dos sensores infravermelhos por outros hidrocarbonetos. O funcionamento normal do instrumento retorna assim que a amostra de gás tiver sido eliminada (LANDTEC, 2005).

#### 3.4.2. Calibração do equipamento

Para garantir que os resultados das amostragens fossem confiáveis foi necessária a calibração do analisador de gases, através da introdução de amostras com concentrações conhecidas de  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , visando estabelecer uma linha que relaciona as concentrações para cada gás. Além desta calibração manual o próprio equipamento passa por calibrações periódicas com seu envio ao setor de manutenção da LANDTEC.

### 3.4.3. Método de coleta e análise dos gases

As análises dos gases foram realizadas através da coleta de aproximadamente 50 ml dos gases por um período de 20 segundos em cada ponto de amostragem, realizadas através de uma agulha hipodérmica acoplada a mangueira de captura dos gases do analisador (Figura 21).



Figura 21 – Coleta de amostras

Os dados eram visualizados na tela do equipamento e repassados a uma planilha (Figura 22), onde o comportamento da coluna era acompanhado periodicamente e possibilitava a análise dos resultados e o ajuste dos fluxos de entrada de gases, bem como a análise da eficiência do processo e da taxa de oxidação de metano.

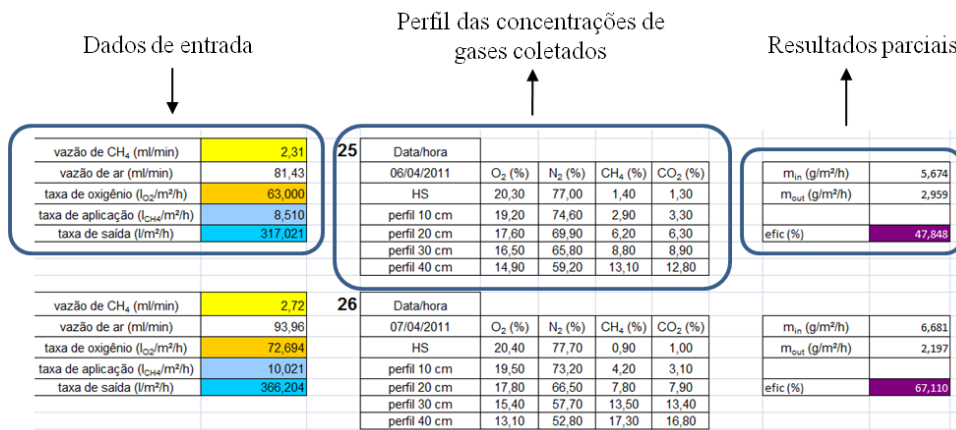


Figura 22 – Planilha de análise de resultados

Na mangueira de coleta de gases é acoplado um pequeno filtro para evitar que partículas sólidas e umidade penetrassem no equipamento ocasionando possíveis problemas operacionais (Figura 23).

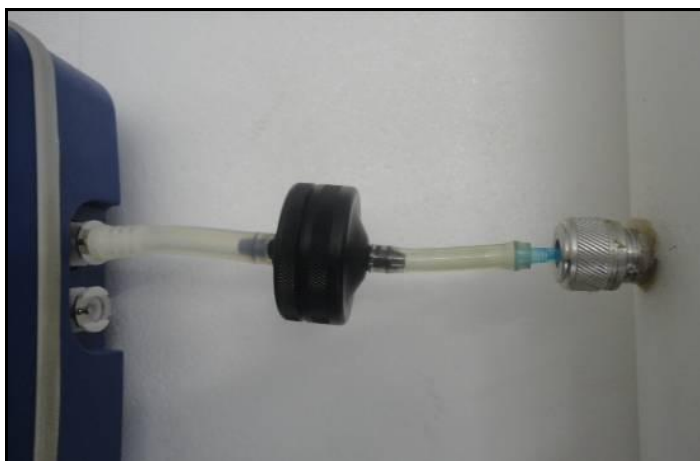


Figura 23 – Mangueira e filtro de coleta de gases

A coleta das amostras e análise dos gases foi realizada de 3 a 7 vezes por semana, de acordo com as alterações de fluxos e respostas das atividades metanotróficas.

### 3.5. DETERMINAÇÃO DA TAXA DE OXIDAÇÃO DO METANO E EFICIÊNCIA DE OXIDAÇÃO

#### 3.5.1. Balanço de massa de CH<sub>4</sub>

Para o cálculo da taxa de oxidação dos ensaios de coluna foi utilizado o balanço de massa. Nele considerou-se a massa de entrada ( $M_{\text{entr}}$ ) e a massa de saída ( $M_{\text{saída}}$ ) de CH<sub>4</sub> determinadas a partir das medições dos fluxos de entrada e saída dos gases e das concentrações em cada ponto de amostragem. A Equação 3 a seguir foi utilizada para calcular a eficiência de oxidação ( $Ef_{\text{oxid}}$ ), enquanto que a taxa de oxidação ( $Tx_{\text{oxid}}$ ) foi calculada através da Equação 4.

$$Ef_{\text{oxid}} = ((M_{\text{entr}} - M_{\text{saída}}) / M_{\text{entr}}) \times 100 \quad \text{Equação 3 – eficiência de oxidação}$$

$$Tx_{\text{oxid}} = M_{\text{entr}} \times (Ef_{\text{oxid}} / 100) \quad \text{Equação 4 – taxa de oxidação}$$

#### 3.5.2. Interpretação dos resultados

Os resultados foram trabalhados em planilhas e expressos em gráficos, demonstrando o comportamento de cada ensaio quanto à oxidação de metano, a eficiência e a taxa de oxidação ao longo de todo o período relativo a cada ensaio, estando detalhado em anexo os cálculos realizados bem como as conversões de unidades. Foram gerados também gráficos demonstrando o perfil de concentração dos gases na coluna em cada ensaio para o dia com a maior taxa de oxidação.

Os resultados dos ensaios geotécnicos e de umidade, grau de saturação, teor de matéria orgânica e pH foram trabalhados e apresentados em forma de tabelas, possibilitando uma análise comparativa dos resultados iniciais e finais e as suas interferências ao processo de oxidação do metano.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS

- Solo de cobertura de Aterro Sanitário;

O presente substrato apresentou as características granulométricas de um solo com 29,75% de areia grossa, 24,37% pedregulho fino, 12,95% de silte, 10,89% de argila, 10,8% de areia média, 7,27% de areia fina e 3,98% de pedregulho médio, conforme pode ser observado na curva granulométrica da Figura 24.

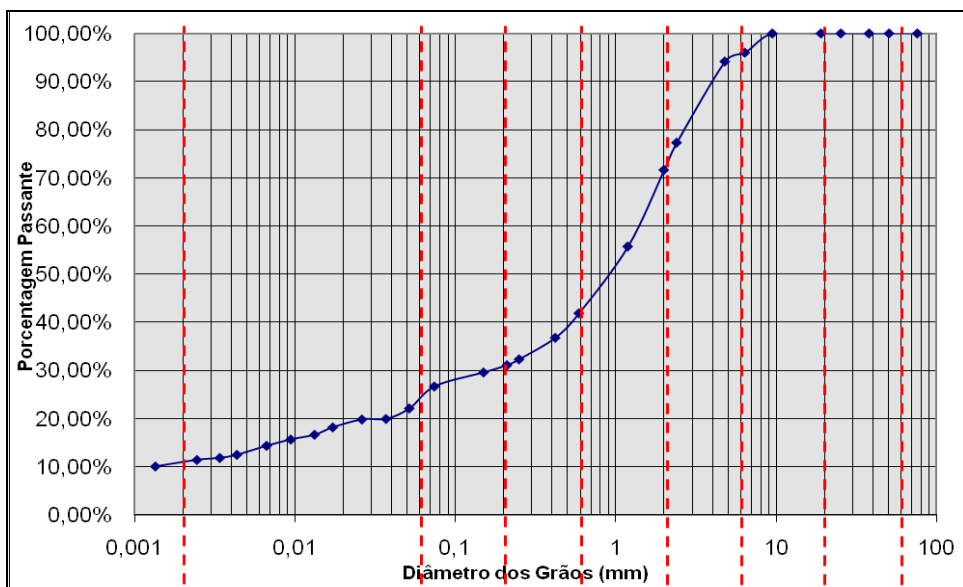


Figura 24 – Curva granulométrica Substrato 1

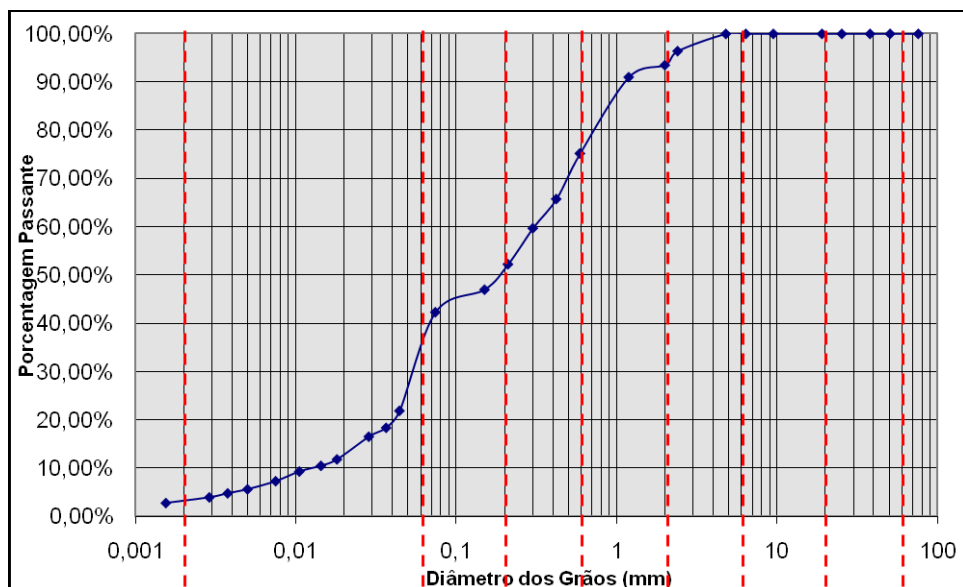
Os demais valores encontrados nos ensaios referentes às características qualitativas e quantitativas do substrato inserido na coluna experimental estão detalhados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Parâmetros do substrato 1**

Substrato	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	S <sub>r</sub> (%)	pH	Massa total (kg)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Solo do aterro sanitário	59	44	15	2,54	26,5	46,3	4,76	8,530	1.309,4

- AE15 (solo com o lodo de estação de tratamento de água e esgoto com um acréscimo de 15% de cal);

Consta de uma mistura de 50%, em peso, de um solo com características granulométricas de 64,23% de argila e 12,15% de silte, e 50% de uma mistura de lodos de estação de tratamento de água e esgoto com o acréscimo de 15% de cal, em peso, com a finalidade de estabilização do lodo e possui as características granulométricas de 59,97% de areia grossa e 23,56% de areia média, conforme pode ser observado na curva granulométrica da Figura 25.

**Figura 25 – Curva granulométrica Substrato 2**

Os demais valores encontrados nos ensaios e referentes às características qualitativas e quantitativas do substrato inserido na coluna experimental estão detalhados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Parâmetros do substrato 2**

Substrato	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$G_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade (%)	$S_r$ (%)	pH	Massa total (kg)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
AE15	71	44	26	2,47	26,5	40,1	8,16	7,110	1.091,34

- E30 (solo com o lodo de estação de tratamento de esgoto com um acréscimo de 30% de cal);

Consta de uma mistura de 50% de um solo com características granulométricas de 64,23% de argila e 12,15% de silte, e 50% de um lodo de uma estação de tratamento de esgoto com o acréscimo de 30% de cal, em peso, com a finalidade de estabilização do lodo e possui as características granulométricas de 28 % de silte, 24,4% de areia grossa, 20,7% de areia média, 17,5% de areia fina e 5,3% de argila. Conforme pode ser observado na curva granulométrica da Figura 26.



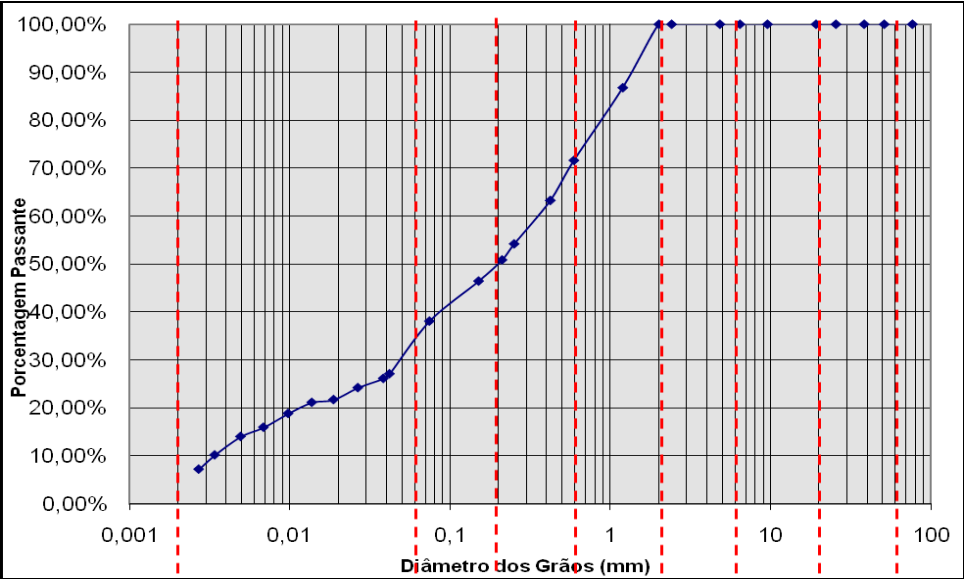


Figura 26 – Curva granulométrica Substrato 3

Os demais valores encontrados nos ensaios e referentes às características qualitativas e quantitativas do substrato inserido na coluna experimental estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros do substrato 3

Substrato	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G <sub>s</sub> (g/cm³)	Umidade (%)	S <sub>r</sub> (%)	pH	Massa total (kg)	Densidade (kg/m³)
E 30	64	38	26	2,34	25,5	41,1	8,16	7,800	1.197,35

Na tabela 9 estão expressos alguns parâmetros geotécnicos dos substratos utilizados e características da coluna experimental.

**Tabela 9 – Parâmetros geotécnicos dos substratos**

SUBSTRATO	DIÂMETRO (cm)	ALTURA DO SUBSTRATO (cm)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)
Solo do aterro sanitário	15	40	1.035,10	46,3
AE15	15	40	826,84	40,1
E30	15	40	954,06	41,1

## 4.2. EFICIÊNCIA E TAXA DE OXIDAÇÃO

### 4.2.1. Ensaio 1 (solo do aterro sanitário; h:40 cm; $S_r$ :46,3%)

Como detalhado no item 3.2 o ensaio 1 consistiu na utilização do solo de cobertura do Aterro Sanitário de Biguaçu – SC, em uma camada de 40 cm e com um grau de saturação de 46,3%. A duração do ensaio foi de 65 dias, sendo a taxa de aplicação mínima de 12,38 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia, com uma eficiência de oxidação de 63% e a taxa de aplicação máxima de 50,29 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia, com uma eficiência de oxidação de 16,2%.

O ensaio 1 teve início com a aplicação de 12,38 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia e 137,4 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dia. Conforme mostrado na Figura 27 durante os primeiros 49 dias de coleta as taxas de aplicação de CH<sub>4</sub> foram aumentando gradualmente até chegar à taxa de aplicação máxima de 50,29 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia no dia 49. Durante o período de ensaio houve um constante aumento nas taxas de aplicação de gases, com pequenas diminuições quando se observou uma queda de eficiência, como pode ser verificado nos dias 11, 29, 52 e 65 (Figura 27).

Para cada diminuição o sistema respondeu rapidamente com um aumento na taxa de oxidação e na eficiência da oxidação do CH<sub>4</sub>. Similarmente, quando ocorreu um alto fluxo de biogás (dia 49), a

eficiência caiu quase que imediatamente, mesmo com um alto fluxo de ar (Figura 27). A taxa de oxidação máxima foi de 19,83 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia no dia 53, com uma eficiência de 73,35% (Figura 28). Os fluxos de entrada de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> variaram e foram ajustados durante o ensaio de acordo com a resposta da coluna.

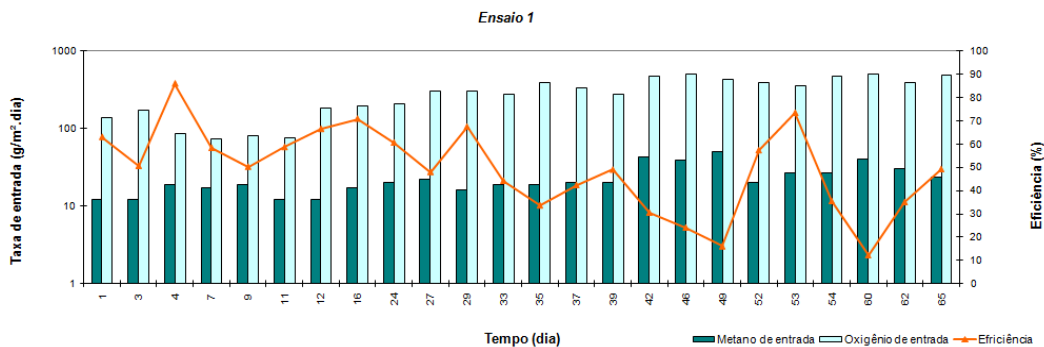


Figura 27 – Taxa de aplicação de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> e taxas de eficiência

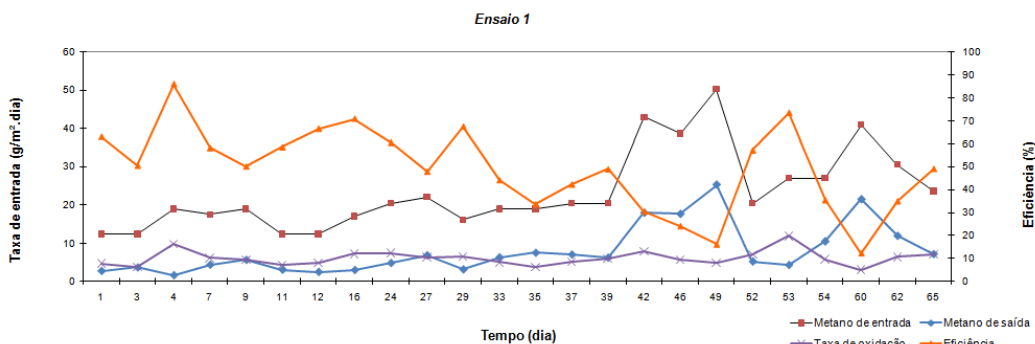


Figura 28 – Taxa de aplicação e oxidação de CH<sub>4</sub> e eficiências do ensaio 1

O fluxo descendente de ar atmosférico, o fluxo ascendente de biogás, o grau de saturação e volume de ar no substrato facilitaram a penetração de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em todo o perfil da coluna. Na Figura 29 pode-se observar o perfil das concentrações de gases para o dia 53, onde ocorreu a maior taxa de oxidação de CH<sub>4</sub>. Quanto mais próximo a superfície as

concentrações de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  foram menores, enquanto as concentrações de  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  foram maiores quanto mais profundos na coluna.

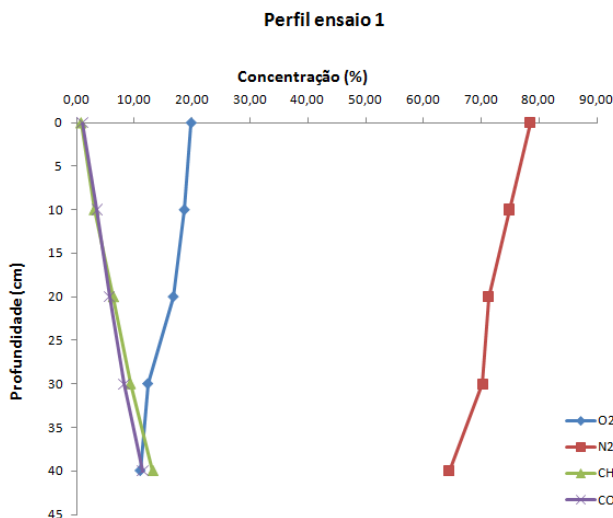


Figura 29 – Perfil da concentração dos gases no solo (dia 53, ensaio 1)

Observa-se que devido à baixa umidade, em torno de 26,5% e o teor de ar no substrato contribuíram para que o  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  penetrassem em todo o perfil da coluna.

Durante a realização deste primeiro ensaio o nível de sensibilidade para ajustar e adequar os fluxos às atividades das bactérias metanotróficas ainda era baixo, permanecendo muito tempo com baixos fluxos de entrada de gases sem buscar aplicações maiores como as que foram realizadas nos ensaios 2 e 3.

Conseqüentemente, acredita-se que este fato tenha acarretado em valores mais baixos quanto à taxa de oxidação máxima.

#### **4.2.2. Ensaio 2 (solo com o lodo de estação de tratamento de água e esgoto com um acréscimo de 15% de cal; h:40 cm; S<sub>r</sub>:40,1%)**

Como detalhado no item 3.2 o ensaio 2 consistiu na utilização de uma mistura de solo com o lodo de estação de tratamento de água e esgoto com um acréscimo de 15% de cal, em uma camada de 40 cm e com um grau de saturação de 40,1%.

A duração do ensaio foi de 38 dias. A taxa de aplicação mínima de CH<sub>4</sub> foi de 8,25 g/m<sup>2</sup>.dia, com uma eficiência de oxidação de 100% e a taxa de aplicação máxima de CH<sub>4</sub> foi de 203,36 g/m<sup>2</sup>.dia, com uma eficiência de oxidação de 24%.

O ensaio 2 iniciou com a aplicação de 8,25 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia e 355,76 g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dia. Conforme mostrado na Figura 27, durante os 38 dias de coleta as taxas de aplicação de CH<sub>4</sub> foram aumentando gradualmente até chegar à taxa de aplicação máxima de 203,36 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia no dia 35. Durante o período de ensaio houve um constante aumento nas taxas de aplicação de gases, com ligeiras diminuições quando se observou uma queda de eficiência, como pode ser verificado nos dias 19,24, 29 e 37 (Figura 30).

Para cada diminuição das taxas de entrada o sistema respondeu rapidamente com um aumento na taxa de oxidação e da eficiência da oxidação do CH<sub>4</sub>. Similarmente, quando ocorreu um alto fluxo de biogás (dia 35), a eficiência caiu quase que imediatamente, mesmo com um alto fluxo de ar (Figura 30). A taxa de oxidação máxima foi de 107,60 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia no dia 34, com uma eficiência de 67,11% (Figura 31). Os fluxos de entrada de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> variaram e foram ajustados durante o ensaio de acordo com a resposta da coluna.

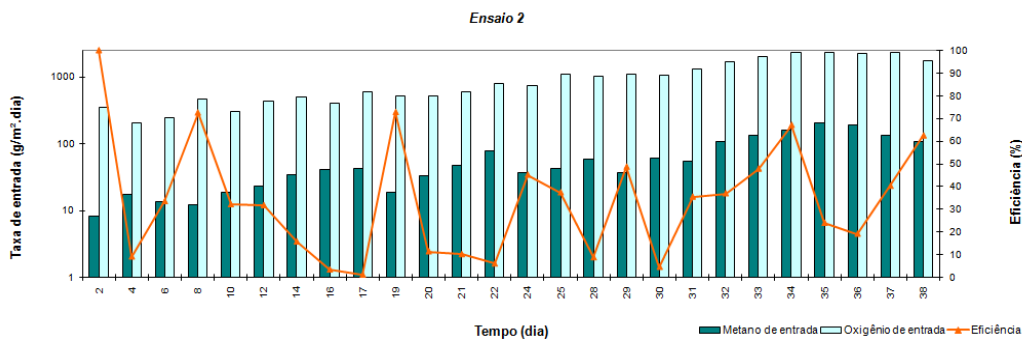


Figura 30 – Taxa de aplicação de CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> e eficiências do ensaio 2

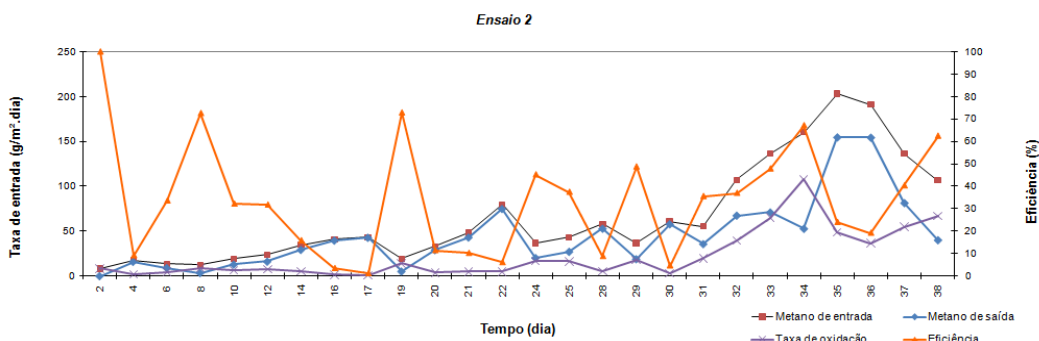


Figura 31 – Taxa de aplicação e oxidação de CH<sub>4</sub> e eficiências do ensaio 2

O fluxo descendente de ar atmosférico, o fluxo ascendente de biogás, o grau de saturação e volume de ar no substrato facilitaram a penetração de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em todo o perfil da coluna. Na Figura 32 pode-se observar o perfil das concentrações de gases para o dia 34, onde ocorreu a maior taxa de oxidação de CH<sub>4</sub>. Quanto mais próximo a superfície as concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> foram menores, enquanto as concentrações de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> foram menores quanto mais profundos na coluna.

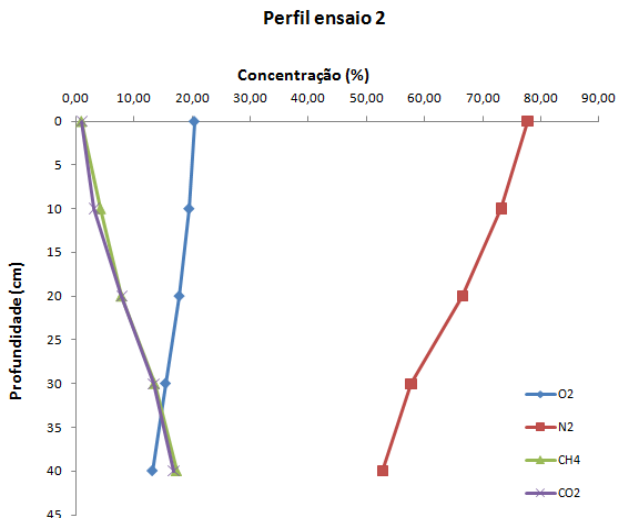


Figura 32 – Perfil da concentração dos gases no solo (dia 34, ensaio 2)

Observa-se que devido à baixa umidade, em torno de 33,43% e o teor de ar no substrato contribuíram para que o O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> penetrassem em todo o perfil da coluna. Durante a realização deste segundo ensaio o nível de sensibilidade para ajustar e adequar os fluxos às atividades das bactérias metanotróficas já estava mais afinado, com aplicações expressivas nos fluxos de entrada dos gases, superiores aos realizados no ensaio 1 e semelhantes aos fluxos inseridos no ensaio 3. Consequentemente a taxa de oxidação máxima alcançada por este substrato foi a mais alta, superior aos resultados das taxas encontradas nos ensaios 1 e 3.

#### 4.2.3. Ensaio 3 (solo com o lodo de estação de tratamento de esgoto com um acréscimo de 30% de cal; h:40 cm; S<sub>r</sub>:41,1%)

Como detalhado no item 3.2 o ensaio 3 consistiu na utilização de uma mistura de solo com o lodo de estação de tratamento de esgoto com um acréscimo de 30% de cal, em uma camada de 40 cm e com um grau de saturação de 41,1%. A duração do ensaio foi de 42 dias. A taxa de aplicação mínima de CH<sub>4</sub> foi de 13,85 g/m<sup>2</sup>.dia, com uma eficiência

de oxidação de 92,4% e a taxa de aplicação máxima de  $\text{CH}_4$  foi de 113,92 g/m<sup>2</sup>.dia, com uma eficiência de oxidação de 36,9%.

O ensaio 3 começou com a aplicação de 13,85 g  $\text{CH}_4$ /m<sup>2</sup>.dia e 465,19 g  $\text{O}_2$ /m<sup>2</sup>.dia. Conforme mostrado na Figura 33, durante os 42 dias de coleta as taxas de aplicação de  $\text{CH}_4$  foram aumentando gradualmente até chegar à taxa de aplicação máxima de 113,92 g  $\text{CH}_4$ /m<sup>2</sup>.dia no dia 40. Durante o período de ensaio houve um constante aumento nas taxas de aplicação de gases, com ligeiras diminuições quando se observou uma queda de eficiência, como pode ser verificado nos dias 10, 23 e 36.

Para cada diminuição o sistema respondeu rapidamente com um aumento na taxa de oxidação e da eficiência da oxidação do  $\text{CH}_4$ . Similarmente, quando ocorreu um alto fluxo de biogás (dia 40), a eficiência caiu quase que imediatamente, mesmo com um alto fluxo de ar (Figura 33).

A taxa de oxidação máxima foi de 55,9 g  $\text{CH}_4$ /m<sup>2</sup>.dia no dia 39, com uma eficiência de 52,3% (Figura 34). Os fluxos de entrada de  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$  variaram e foram ajustados durante o ensaio de acordo com a resposta da coluna. O fluxo descendente de ar atmosférico, o fluxo ascendente de biogás, o grau de saturação e volume de ar no substrato facilitaram a penetração de  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  em todo o perfil da coluna.

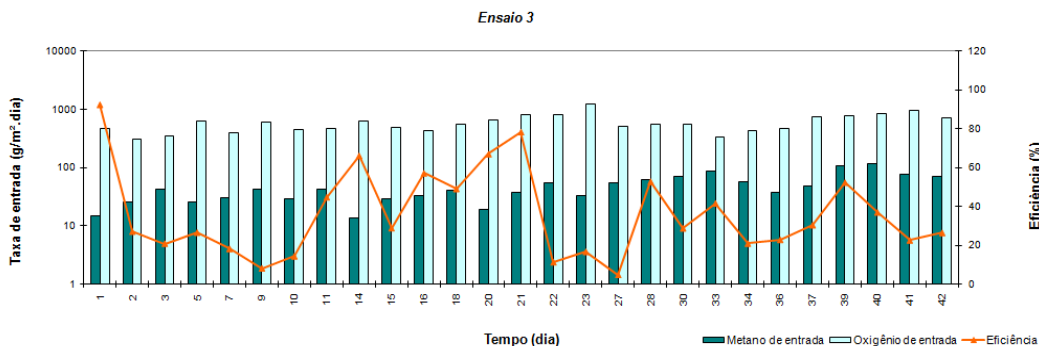


Figura 33 – Taxa de aplicação de  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$  e eficiências do ensaio 3



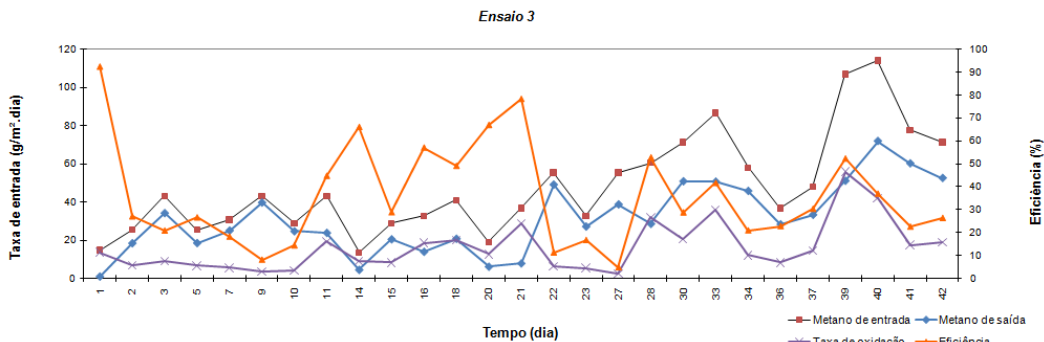


Figura 34 – Taxa de aplicação e oxidação de CH<sub>4</sub> e eficiências do ensaio 3

Na Figura 35 pode-se observar o perfil das concentrações de gases para o dia 39, onde ocorreu a maior taxa de oxidação de CH<sub>4</sub>. Quanto mais próximo a superfície as concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> foram menores, enquanto as concentrações de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> foram menores quanto mais profundos na coluna. Observa-se que devido à baixa umidade, em torno de 25,5% e o teor de ar no substrato contribuíram para que o O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> penetrassem em todo o perfil da coluna.

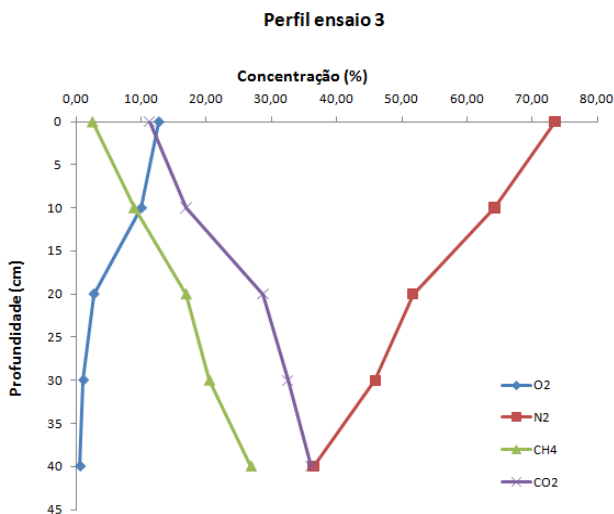


Figura 35 – Perfil da concentração dos gases no solo (dia 39, ensaio 3)

Durante a realização deste terceiro ensaio o nível de sensibilidade para ajustar e adequar os fluxos às atividades das bactérias metanotróficas estava ainda mais afinado, com aplicações expressivas nos fluxos de entrada dos gases, superiores aos realizados no ensaio 1 e mais próximos as aplicações do ensaio 2.

Em vista disto e de acordo com as características de cada substrato a taxa de oxidação máxima deste ensaio foi superior ao resultado encontrado no ensaio 1 e inferior ao resultado encontrado no ensaio 2. Não tendo a ordem de utilização de cada substrato um fator de interferência nos resultados alcançados

#### 4.3. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO APÓS OS ENSAIOS

Após o término de cada ensaio foram realizadas análises dos substratos tendo por objetivo verificar mudanças no pH, matéria orgânica e teor de água, identificando o grau de saturação, teor de ar e as razões para a variação desses parâmetros. Teor de umidade, matéria orgânica e pH do substrato foram medidos no início e no final de cada ensaio de oxidação e todas as análises foram feitas em triplicata.

##### 4.3.1. pH

Nos 3 ensaios o pH foi medido no início de cada um e no final foi analisado por camadas de 10 cm buscando avaliar o comportamento do pH no perfil da coluna. O pH dos ensaios 1, 2 e 3 estão apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 – pH dos ensaios**

Ensaio	pH inicial	pH final			
		0 – 10 (cm)	10 – 20 (cm)	20 – 30 (cm)	30 – 40 (cm)
1	5,53	4,29	4,98	5,04	5,05
2	8,16	7,73	7,79	7,90	8,00
3	9,46	9,22	9,23	9,32	9,39

Os substratos 1 e 2 apresentaram um pH inicial dentro da faixa favorável à oxidação, com pH entre 4 e 9, conforme relataram Hilger et al. (2000b) e Humer e Lechner (1999). O substrato 3 apresentou um pH ligeiramente maior que o limite relatado por estes autores.

Os valores encontrados no pH final de cada substrato mostraram uma ligeira acidificação nas camadas mais próximas a superfície se comparado ao valor inicial. Esta alteração ocorre devido ao processo intenso de atividade das bactérias metanotróficas naquela faixa de substrato, realizando a oxidação do metano. Fato este também foi comprovado nas análises de Roncato (2009), Einola et al. (2008) e Hilger et al. (2000), que encontraram as mesmas características nos perfis de pH ao longo de suas colunas.

#### **4.3.2. Umidade**

Os valores de umidade para os 3 ensaios estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 – Umidade dos substratos**

Ensaio	umidade inicial (%)	umidade final (%)			
		0 – 10 (cm)	10 – 20 (cm)	20 – 30 (cm)	30 – 40 (cm)
1	26,50	25,30	23,53	23,37	22,60
2	33,43	30,36	27,62	29,04	29,39
3	25,50	32,80	30,77	30,99	30,80

A partir da umidade identificou-se o grau de saturação e volume de ar nos substratos antes e após os ensaios, como pode ser observado na Tabela 12 e 13.

**Tabela 12 – Grau de saturação dos substratos**

Ensaio	Saturação inicial (%)	Saturação final (%)			
		0 – 10 (cm)	10 – 20 (cm)	20 – 30 (cm)	30 – 40 (cm)
1	46,30	44,20	41,11	40,83	42,05
2	40,88	37,13	33,78	35,52	35,94
3	41,08	52,84	49,57	49,92	49,61

**Tabela 13 – Teor de ar nos substratos**

Ensaio	Teor de ar inicial (%)	Teor de ar final (%)			
		0 – 10 (cm)	10 – 20 (cm)	20 – 30 (cm)	30 – 40 (cm)
1	0,318	0,331	0,349	0,351	0,359
2	0,395	0,420	0,443	0,431	0,428
3	0,349	0,279	0,299	0,297	0,298

Os resultados dos teores de umidade finais para os 3 substratos apresentaram semelhanças com valores inferiores aos iniciais e com um teor de umidade mais elevado na faixa próxima a superfície (0 – 10 cm). Este fato pode ser associado à alta atividade oxidativa nesta faixa, conforme referências que analisaram o comportamento bacteriano. A mesma semelhança ocorreu para o grau de saturação inicial e final nos 3 substratos por estar diretamente relacionado ao teor de umidade. O grau de saturação apresentou-se maior na camada superficial (0 – 10 cm) e isso pode ter contribuído com a redução de eficiência final, visto causar um impedimento na penetração de ar.

Segundo Cabral *et al* (2004) o teor de água muito alto pode retardar o transporte de gás através do solo, pois a difusão molecular na água é aproximadamente 104 vezes mais lenta que no ar. Conseqüentemente quando o grau de saturação do solo atinge valores próximos a 85% o gás deve difundir-se a fase líquida reduzindo assim a disponibilidade de gases e limitando a oxidação do metano (CABRAL et al. 2004). Fato este que pode ser observado nos teores de ar iniciais e finais, tendo a camada superior (0 -10 cm) um valor inferior de volume de ar devido um maior teor de umidade e grau de saturação.

#### **4.3.3. Teor de matéria orgânica**

O teor de matéria orgânica para os 3 ensaios estão apresentados na Tabela 14

**Tabela 14 – Teor de matéria orgânica dos substratos**

Ensaio	Matéria orgânica inicial (%)	Matéria orgânica final (%)			
		0 – 10 (cm)	10 – 20 (cm)	20 – 30 (cm)	30 – 40 (cm)
1	5,57	7,83	7,03	6,57	5,34
2	20,49	23,79	22,64	21,65	18,84
3	25,49	30,48	28,26	26,08	25,85

Os resultados dos teores de matéria orgânica finais para os 3 substratos apresentaram semelhanças com valores inferiores aos iniciais e com um teor de matéria orgânica mais elevado na faixa próxima a superfície (0 – 10 cm). Este fato se deve a grande atividade oxidativa atribuída ao crescimento da colônia microbiana nesta faixa, o que resulta em um maior teor de matéria orgânica devido ao aumento de biomassa, conforme relataram Roncato (2009), Einola et al. (2008) e Hilger et al. (2000).

#### 4.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a utilização dos 3 tipos de substratos chegou-se aos valores máximos da taxa de oxidação e ganhos de eficiência de oxidação de metano, conforme pode ser verificado na Tabela 15, na qual apresenta também o substrato utilizado, seu grau de saturação e altura do mesmo.

**Tabela 15 – Resultados finais**

Ensaio	Substrato	Sr (%)	h (cm)	Taxa de oxidação máxima (g/m <sup>2</sup> dia)	Eficiência de oxidação (%)
1	Solo aterro sanitário	46,30	40	19,83	73,35
2	AE15	39,77	40	107,6	67,11
3	E30	41,08	40	55,9	52,28

Diante dos resultados encontrados o ensaio 1 mostrou-se com a menor taxa de oxidação máxima de metano, fato este devido a característica do substrato, a qual tem uma influencia direta na adaptação das bactérias metanotróficas, como também devido ao maior grau de saturação, menor teor de matéria orgânica e pelos fluxos de entrada de biogás e ar atmosférico terem sido mais prolongados, com 66 dias de ensaio, porém, com valores máximos menores aos fluxos introduzidos nos ensaios 2 e 3.

Este fato ocorreu em decorrência da sensibilidade às mudanças de fluxos, os quais permaneceram baixos por um longo período afetando o comportamento das bactérias metanotróficas quanto a sua capacidade máxima de oxidação.

O ensaio 2 apresentou a maior taxa de oxidação máxima de metano, fato este que se deve ao tipo de substrato utilizado, onde apresentou uma grande quantidade de matéria orgânica e um menor grau de saturação, bem como devido a uma introdução gradual dos fluxos de biogás e ar atmosférico a níveis mais elevados, por um período menor se comparado ao ensaio 1, com 38 dias, demonstrando a capacidade máxima de oxidação do substrato. Diante da experiência adquirida quanto a sensibilidade das bactérias aos mais diferentes fluxos de entrada, os ensaios 2 e 3 seguiram com mais rigor o aumento gradual dos fluxos visando obter as maiores taxas de oxidação do metano,

estando de acordo com os experimentos de Einola et al. (2008) e Roncato (2009).

Todos os ensaios foram realizados com a espessura de 40 cm de substrato o que não apresentou influência direta entre os resultados alcançados nas taxas de oxidação para os 3 ensaios. A umidade e o grau de saturação no substrato ao final de todos os ensaios apresentaram valores inferiores aos iniciais, com valores mais elevados nos 10 cm próximos a superfície. Fato este resultante do elevado processo de oxidação nesta faixa de substrato e devido também ao grande suprimento de oxigênio e geração de água.

Por consequência, quanto maior o processo de oxidação na coluna esta camada tende a aumentar gradativamente o seu grau de saturação, impedindo com isso a penetração de oxigênio, como foi observado diante dos valores mais baixos quanto aos teores de ar nos substratos próximos a superfície, proporcionando uma diminuição na eficiência de oxidação da coluna, fato este também observado por Cabral et al. (2004).

Segundo Humor e Lechner (1999) o grau de saturação ideal para a atividade metanotrófica está entre 40 e 80%. Diante dos resultados apresentados os valores do grau de saturação para os 3 ensaios se encontram próximos ao limiar mínimo desta faixa sugerida pelo autor.

Identificou-se que os principais fatores para as variações das taxas de oxidação nos ensaios estão relacionadas ao tipo de substrato, os fluxos de entrada de gases, a elevada penetração de ar atmosférico em todo o perfil da coluna e ao grau de saturação.

As análises dos substratos antes e após cada corrida experimental puderam demonstrar que os valores iniciais de pH foram superiores em todos os ensaios, sendo que os valores finais apresentaram um valor mais baixo nos 10 cm superiores da coluna, razão esta devida a alta atividade metanotrófica nesta faixa do substrato. Fato este afirmado com base em pesquisas como de Hilger et al. (2000), Einola et al. (2008) e Roncato (2009) que encontraram resultados semelhantes com base no comportamento metanotrófico.



Diante dos resultados encontrados para os teores de matéria orgânica, observou-se que os resultados iniciais foram mais baixos nos 3 ensaios, apresentando nos ensaios finais elevados teores de matéria orgânica nos 10 cm superiores da coluna, fato este resultante da elevada atividade microbiana na oxidação do metano nesta faixa da coluna.

Os resultados das taxas de oxidação máxima de metano nos ensaios variaram entre 19,83 e 107,6 g CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.dia, com ganhos de eficiência entre 52,28 e 73,35%. De acordo com os resultados encontrados em literatura (tabela 4) existiu uma correlação entre as metodologias utilizadas, tipos de substratos e consequentemente a compatibilidade dos resultados de máxima oxidação encontrada neste trabalho se comparados aos experimentos com semelhantes características representados na tabela em questão. No entanto, cada pesquisa apresentou seus diferenciais nas vazões de entrada de metano e ar atmosférico, na altura e tipo de cada substrato e consequentemente nas taxas de oxidação máxima alcançadas.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho de mestrado visou desenvolver um experimento em escala laboratorial para um sistema de biorecobrimento para oxidação passiva de metano (BOPM). O objetivo geral do trabalho foi alcançado com a análise e avaliação da taxa de oxidação do metano por bactérias metanotróficas em diferentes substratos potenciais, através de ensaios de coluna, simulando as camadas de cobertura de aterros sanitários.

Foram utilizados 3 substratos, identificados em literatura com potenciais para oxidação, com diferentes graus de saturação e a mesma espessura, 40 cm, objetivando determinar as configurações que proporcionem melhores eficiências na oxidação do metano. Nos 3 ensaios a taxa de oxidação máxima de metano variou entre 19,83 e 107,6 g  $\text{CH}_4/\text{m}^2.\text{dia}$ , representando ganhos de eficiência de 52,28 e 73,35%. A taxa de oxidação mais elevada foi obtida para o ensaio 2, o qual possuía o menor grau de saturação frente aos outros 2 substratos.

Devido a baixa sensibilidade na alteração dos fluxos de entrada os resultados do substrato 1 apresentaram valores reduzidos de entrada de gases, o que repercutiu em menores taxas de oxidação se comparados aos outros substratos, porém, se observou a capacidade de oxidação do  $\text{CH}_4$  mesmo em fluxos mais baixos.

As condições operacionais nas alterações dos fluxos de entrada de gases foram determinantes para os resultados encontrados, proporcionando um ambiente propício para a atividade bacteriana e seu correto monitoramento. Dentre os fatores mais importantes e susceptíveis de variar a taxa de oxidação foram a oferta de  $\text{CH}_4$  e ar atmosférico, o conteúdo de matéria orgânica e o grau de saturação dos substratos, o qual influencia diretamente outros parâmetros como o conteúdo de ar, importante parâmetro que determina a possibilidade ou não de entrada de ar atmosférico no substrato.

Os resultados encontrados puderam demonstrar o potencial de oxidação de cada substrato, sendo possível a sua correlação aos resultados da literatura, onde os valores se encontram próximos em experimentos semelhantes.

Antes e após os ensaios de oxidação os substratos foram analisados para avaliar o seu comportamento e influencia nos resultados. Foram realizadas análises de pH, teor de matéria orgânica e grau de saturação. Diante dos resultados encontrados observou-se que não houve alterações significativas nos valores de pH e matéria orgânica. Já para o grau de saturação os 10 cm superiores apresentaram uma diferença significativa entre os valores inicial e final, com valores superiores no final, fator este que pode vir a interferir na oxidação do  $\text{CH}_4$  devido o impedimento da penetração de  $\text{O}_2$ .

O instrumento analítico utilizado foi um analisador portátil recomendado para utilização em campo, o GEM 2000 e demonstrou ser um equipamento útil também para pesquisa em colunas, com uma precisão entre 0,3 e 1 %.

Portanto, devido à grande problemática existente com a emissão de gases de aterros sanitários a utilização de biorecobrimentos para oxidação passiva do metano se demonstra uma importante ferramenta para controle das emissões de  $\text{CH}_4$ , com elevada eficiência.

Desta forma as pesquisas em coluna buscam simular as condições de campo, tendo como diferencial o controle de entrada de gases e as análises em profundidades, propiciando uma análise do comportamento bacteriano de cada substrato na oxidação do metano.

Diante da utilização das técnicas de oxidação do  $\text{CH}_4$  na superfície dos Aterros Sanitários pode se evitar a emissão deste gás com grande potencial impactante diretamente para a atmosfera. De todo o biogás gerado em um Aterro Sanitário 25% escapa dos sistemas de drenagem de gases e é emitido para a atmosfera ocasionando impactos ambientais. Todavia, as técnicas de biorecobrimento visam amenizar este impacto através da oxidação do metano na camada de cobertura dos aterros.

Existe ainda um potencial futuro de utilização destas metodologias para a obtenção de créditos de carbono, porém, as técnicas ainda estão sendo desenvolvidas para se conseguir identificar com precisão quanto  $\text{CH}_4$  realmente foi oxidado na camada de cobertura dos aterros sanitários, podendo então este valor ser convertido em créditos.

Para futuras pesquisas nesta área têm-se as seguintes recomendações:

- Realizar testes com um período mais longo de análises buscando uma adaptação maior das bactérias e consequentemente melhores taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$ ;
- Utilizar biogás produzido naturalmente ao invés de um gás com composição artificial, analisando também a oxidação dos outros compostos existentes no biogás de aterros sanitários;
- Utilizar diferentes espessuras e densidades do mesmo substrato para identificar as melhores configurações;
- Utilizar diferentes graus de saturação dos substratos para identificar o comportamento de cada um frente ao conteúdo de água, ar e a respiração das bactérias no substrato e sua capacidade de oxidação do  $\text{CH}_4$ ;
- Analisar os gases através de um cromatógrafo gasoso;
- Construir mais de uma coluna experimental proporcionando um maior número de testes simultâneos;
- Utilizar válvulas e equipamentos com maior precisão de controle operacional;
- Realizar testes de respiração para evitar superestimar a taxa de oxidação;
- Realizar ensaios de metais e  $\text{NH}_4$ , verificando a existência de ações inibitórias;
- Realizar ensaios de condutividade hidráulica dos substratos;
- Realizar experimento simultâneo em uma célula de aterro sanitário, possibilitando análises comparativas entre as técnicas;
- Realizar análise qualitativa e quantitativa das bactérias metanotróficas existentes;



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRELPE (2009) "Panorama dos resíduos sólidos no Brasil". Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, SP.
- Askri, M. A. (2008) "Suivi de l'efficacité de trois bio-recouvrements d'oxydation passive du méthane installés sur un site d'enfouissement," Département de génie civil. Sherbrooke: Université de Sherbrooke, p 136.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004. Resíduos sólidos: classificação. Setembro de 1987.
- Bahr, T., Fricke, K., Hillebrecht, K., Kölsch, F., Reinhard, B. (2006). "Clean Development Mechanism – Tratamento de Resíduos Sólidos e Oxidação de Gás Metano para Minimização de Emissões". Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamento de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, Brasil, abril 2006
- Barlaz, M. A., Green, R. B., Chanton, J. P., Goldsmith, C. D. et Hater, G. R. (2004) "Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions," Environmental Science and Technology, Vol. 38, No. 18, pp 4891-4899.
- Bender, M. et Conrad, R. (1995) "Effect of CH<sub>4</sub> concentrations and soil conditions on the induction of CH<sub>4</sub> oxidation activity," Soil Biology and Biochemistry, Vol. 27, No. 12, pp 1517-1527.
- Bogner, J. E., Spokas, K. A. (1993) "Landfill CH<sub>4</sub>: Rates, Fates and Role in Global Carbon Cycle," Chemosphere, Vol. 26, pp 369-386.
- Bohn, C. H. (2003) "Modelo de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais". Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- Börjesson, G., J. Chanton B.H. Svensson (2001) "Methane oxidation in two Swedish landfill covers measured with carbon-13 to carbon-12 isotope ratios," J. Environ. Qual., Vol. 30, pp 369-376.

- Cabral, A.R., K. Arteaga, D. Rannaud, S. Aït-Benichou, M.F. Pouët, S. Allaire, L-B. Jugnia et C.W. Greer (2007) "Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier," In: R. Cossu, and R. Stegman, Eds., 11th International Waste Management and Landfill Symposium. Sta. M. di Pula, Italy.
- Cabral, A.R., J.F. Moreira, Mohamed Ali Askri, A.K. Santos, L.B. Jugnia (2008) "Engineering landfill covers for methane oxidation: lessons learned," 5th International Landfill Research Symposium. Colorado.
- Cabral, A.R., P. Tremblay, G. Lefebvre (2004) "Determination of the diffusion coefficient of oxygen for a cover system composed of pulp and paper residues.," *Geot. Testing J.*, Vol. 27, No. 2, pp 184-197.
- Cassini, S. T.; Vazoller, R. F.; Pinto, M. T. (2003) "Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás". CASSINI, S. T. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 1-9.
- Castilhos JR, A. B.; Medeiros, P. A.; Firta, I. N.; Lupatini, G.; Silva J. D. "Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos". In: *Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte*. Castilhos JR, A. B. (Coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p. 19-50.
- Chanton, J. P. et Liptay, K. (2000) "Seasonal Variation in Methane Oxidation in a Landfill Cover Soil as Determined by an In situ Stable Isotope Technique," *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 14, pp 51-60.
- Chanton, J. P., C. M. Rutkowski, B. Mosher (1999) "Quantifying methane oxidation from landfills using stable isotope analysis of downwind plumes," *Environmental Science and Technology*, Vol. 33, No. 21, pp 3755-3760.
- Christophersen, M., L. Linderod, P. E. Jensen, P. Kjeldsen (2000) "Methane oxidation at low temperatures in soil exposed to landfill gas," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 29, No. 6, pp 1989-1997.

- Czepiel, P., B. Mosher, P. Crill, R. Harriss (1996) "Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. 11, pp 16721-16729.
- D'Almeida, M. L. O.; Vilhena, A. (2000) "Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado". 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p.
- De Visscher, A., Michael Schippers, and Oswald Van Cleemput (2001) "Short-term kinetic response of enhanced methane oxidation in landfill cover soils to environmental factors," *Biology and Fertility of Soils*, Vol. 33, No. 3, pp 231-237.
- Einola, J. M., A. E. Karhu, J. A. Rintala (2008) "Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions," *Waste Management*, Vol. 28, No. 1, pp 97-111.
- ESMAP (2004) "The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean". Waterloo, Ontario, 2004.
- Figueroa, R. A. (1993) Methane Oxidation in Landfill Top Soils. Proceedings, Sardinia 1993, Fourth International Landfill Symposium. Vol. I, CISA, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 701-715.
- Gebert, J., A. Gröngroft, G. Miehl (2003b) "Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters," *Waste Management*, Vol. 23, No. 7, pp 609-619.
- Gebert, J. et Gröngroft, A. (2006a) "Passive landfill gas emission - Influence of atmospheric pressure and implications for the operation of methane-oxidising biofilters," *Waste Management*, Vol. 26, No. 3, pp 245-251.
- Gebert, J. et Gröngroft, A. (2006b) "Performance of a passively vented field-scale biofilter for the microbial oxidation of landfill methane," *Waste Management*, Vol. 26, No. 4, pp 399-407.



- Gunnerson C. G.; Stuckey, D. C (1986). "Anaerobic digestion". Tech. Pap. 49, World Bank, Washington, D.C, 1986.
- Hilger, H. et Humer, M. (2003) "Biotic Landfill Cover Treatments for Mitigating Methane Emissions," *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 84, No. 1, pp 71-84.
- Hilger, H.A., David F. Cranford, M. A. Barlaz (2000a) "Methane oxidation and microbial exopolymer production in landfill cover soil," *Soil Biol. Bioch.*, Vol. 32, pp 457-467.
- Hilger, H. A., Wollum A. G., Barlaz M. A. (2000b) "Landfill methane oxidation response to vegetation, fertilization, and liming", *Journal of Environmental Quality*, Vol. 29, No. 1, pp 324-334.
- Hilger, H., Bogner, J., Adams, B., Hamm, J., Besnard, F., Bodrossy, L., Oliver, J.D. (2007) Bio-Tarp: developing a methanotrophic alternative daily cover to reduce landfill methane emissions. In: Cossu, R., Diaz, L. F., & Stegmann R. (eds.) *Proc. Sardinia 2007: Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*, 1–5 October 2007, Margherita di Pula, Italy.
- Huber-Humer, M., J. Gebert, H. Hilger (2008) "Biotic systems to mitigate landfill methane emissions," *Waste Management & Research*, Vol. 26, No. 1, pp 33-46.
- Huber-Humer, M., S. Roder, P. Lechner (2009) "Approaches to assess biocover performance on landfills," *Waste Management*, Vol. 29, No. 7, pp 2092-2104.
- Humer, M. et Lechner, P. (1999) "Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills," *Waste Management Research*, No. 17, pp 443-452.
- Humer, M. et Lechner, P. (2001a) "Microbial Methane Oxidation for the Reduction of Landfill Gas Emissions," *Journal of Solid Waste Technology and Management*, Vol. Vol. 27, pp No. 3-4.
- Humer, M. et Lechner, P. (2001b) "Microorganisms against the Greenhouse Effect as Suitable Cover Layers for the Elimination of Methane Emissions from Landfills," *6th Annual Landfill*

*Symposium*. San Diego, CA Solid Waste Association of North America (SWANA), pp 305-318.

IBAM (2001). Instituto Brasileiro de Administração Municipal. "Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos". Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

IBGE (2000). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. "Pesquisa Nacional de Saneamento Básico". Brasil, 2000.

IPCC (2007) "Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPT/CEMPRE. 1995. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo, IPT, 1995.

Kettunen, R. H., J. M. Einola, J. A. Rintala (2006) "Landfill methane oxidation in engineered soil columns at low temperature," Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 177, No. 1-4, pp 313-334.

Kightley, D., D. B. Nedwell, M. Cooper (1995) "Capacity of methane oxidation in landfill cover soils measured in laboratory-scale soil microcosms," Appl. Environ. Microbiol., Vol. 61, pp 592-601.

Knapp, C., Fowle, D., Kulczycki, E., Roberts, J. Et Graham, D. (2007). "Methane monooxygenase gene expression mediated by methanobactin in the presence of mineral copper sources", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 104, no 29, 12040-12045.

Lei federal nº 12.305, de 2 agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2010.

Maciel, F. J. (2003) "Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE". Recife, 2003. 173p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

- Mcbean, E. A.; Rovers, F. A.; Farquar, G. J. Solid waste landfill engineering and design. Presentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 1995. 521p.
- Mohanty, S., Bharati, K., Deepa, N., Rao, V. et Adhya, T. (2000). "Influence of heavy metals on methane oxidation in tropical rice soils", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 47, no. 3, pp. 277-284.
- NBR 8419/92 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos não perigosos, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- NBR 13896/97 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação - Procedimento , Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- Orofino, F. V. G. (2002). Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis. Florianópolis: COMCAP, 2002. 112p.
- Perdikea, K., A. K. Mehrotra, J. P. A. Hettiaratchi (2008) "Study of thin biocovers (TBC) for oxidizing uncaptured methane emissions in bioreactor landfills," *Waste Management*, Vol. 28, No. 8, pp 1364-1374.
- Philopoulou, A., Felske C., McCartney D. (2008) "Field-scale treatment of landfill gas with a passive methane oxidizing biofilter," *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 7, No. 5, pp 531-542.
- Philopoulou, A., Ruck J., McCartney D., Felske C. (2009) "A laboratory-scale comparison of compost and sand--compost--perlite as methane-oxidizing biofilter media," *Waste Management Research*, Vol. 27, No. 2, pp 138-146.
- Prim, E.C.C. (2008) Reaproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Esgoto como Material de Cobertura de Aterro Sanitário. Projeto de qualificação para doutoramento. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008

- Roncato, C. (2009) "Étude des taux d'oxydation du méthane dans des colonnes expérimentales simulant un biorecouvrement de site d'enfouissement", Sherbrooke (Québec) Canada.
- Scheutz, C., Bogner, J., De Visscher, A., Gebert, J., Hilger, H., Huber-Humer, M., Kjeldsen, P. et Spokas, K. (2009) "Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions," *Waste Management & Research*, Vol. 27, pp 409-455.
- Scheutz, C. et P. Kjeldsen (2004) "Environmental factors influencing attenuation of methane and hydrochlorofluorocarbons in landfill cover soils," *J. Environ. Qual.*, Vol. 33, pp 72-79.
- Stern, J. C., J. Chanton, T. Abichou, D. Powelson, L. Yuan, S. Escoriza, J. Bogner (2007) "Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation," *Waste Management*, Vol. 27, No. 9, pp 1248-1258.
- Takeda, A. Kodi. (2002). Análise da gestão seletiva e domiciliar dos resíduos sólidos. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- Wilshusen, J. H., Hettiaratchi J. P. A., Stein V. B. (2004) "Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns," *Waste Management*, Vol. 24, No. 7, pp 643-653.
- Wuebbles, D. J., Hayhoe, K. (2002) "Atmospheric methane and global change," *Earth-Science Reviews*, Vol. 57, pp 177-210.



## ANEXO A – Planilha de cálculos ensaio 1

Tempo (d)	CH <sub>4</sub> entrada (l/m <sup>3</sup> /h)	CH <sub>4</sub> entrada (g/m <sup>3</sup> /h)	CH <sub>4</sub> entrada (g/m <sup>3</sup> /d)	O <sub>2</sub> entrada (l/m <sup>3</sup> /h)	O <sub>2</sub> entrada (g/m <sup>3</sup> /h)	O <sub>2</sub> entrada (g/m <sup>3</sup> /d)	Eficiência (%)	Taxa de oxidação (g/m <sup>3</sup> /h)
1	0,77	0,52	12,38	4,29	5,73	137,40	63,04	0,33
3	0,77	0,52	12,38	5,40	7,20	172,81	50,67	0,26
4	1,19	0,79	18,98	2,70	3,60	86,40	85,88	0,68
7	1,09	0,73	17,51	2,27	3,03	72,79	58,35	0,43
9	1,19	0,79	18,98	2,52	3,36	80,71	50,29	0,40
11	0,77	0,52	12,38	2,36	3,15	75,51	58,69	0,30
12	0,77	0,52	12,38	5,73	7,63	183,21	66,49	0,34
16	1,07	0,71	17,09	6,10	8,13	195,09	70,83	0,50
24	1,28	0,85	20,45	6,51	8,69	208,46	60,60	0,52
27	1,38	0,92	22,05	9,45	12,60	302,29	48,03	0,44
29	1,01	0,67	16,15	9,45	12,60	302,29	67,41	0,45
33	1,19	0,79	18,98	8,75	11,67	280,01	44,31	0,35
35	1,19	0,79	18,98	12,19	16,26	390,18	33,77	0,27
37	1,28	0,85	20,45	10,50	14,00	335,96	42,45	0,36
39	1,28	0,85	20,45	8,58	11,44	274,56	49,02	0,42
42	2,69	1,79	43,02	14,54	19,38	465,18	30,65	0,55
46	2,42	1,61	38,72	15,74	20,99	503,68	24,27	0,39
49	3,14	2,10	50,29	13,50	18,00	432,00	16,22	0,34
52	1,28	0,85	20,45	12,19	16,25	390,08	57,32	0,49
53	<b>1,69</b>	<b>1,13</b>	<b>27,04</b>	<b>11,12</b>	<b>14,83</b>	<b>355,84</b>	<b>73,35</b>	<b>0,83</b>
54	1,69	1,13	27,04	14,54	19,39	465,28	35,59	0,40
60	2,56	1,71	40,96	15,74	20,99	503,68	12,41	0,21
62	1,91	1,27	30,53	12,19	16,25	390,08	35,15	0,45
65	<b>1,48</b>	<b>0,99</b>	<b>23,68</b>	<b>15,12</b>	<b>20,16</b>	<b>483,84</b>	<b>49,27</b>	<b>0,49</b>



## ANEXO B – Planilha de cálculos ensaio 2

Tempo (d)	CH <sub>4</sub> entrada (l/m <sup>2</sup> /h)	CH <sub>4</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /h)	CH <sub>4</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /d)	O <sub>2</sub> entrada (l/m <sup>2</sup> /h)	O <sub>2</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /h)	O <sub>2</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /d)	Eficiência (%)	Taxa de oxidação (g/m <sup>2</sup> /h)
2	0,52	0,34	8,25	11,12	14,82	355,76	100,00	0,34
4	1,09	0,73	17,51	6,50	8,67	207,96	9,15	0,07
6	0,85	0,57	13,62	7,56	10,08	241,88	33,56	0,19
8	0,77	0,52	12,38	14,54	19,38	465,19	72,56	0,37
10	1,19	0,79	18,98	9,45	12,60	302,29	32,14	0,25
12	1,48	0,98	23,64	13,50	18,00	432,02	31,73	0,31
14	2,17	1,44	34,66	15,74	20,99	503,81	15,80	0,23
16	2,56	1,71	40,97	12,60	16,79	403,05	3,39	0,06
17	2,70	1,80	43,21	18,90	25,20	604,82	1,08	0,02
19	1,19	0,79	18,98	16,43	21,91	525,85	72,81	0,58
20	2,04	1,36	32,72	16,43	21,91	525,85	11,41	0,16
21	2,99	1,99	47,86	18,90	25,20	604,82	10,16	0,20
22	4,98	3,32	79,64	25,20	33,60	806,35	6,01	0,20
24	2,30	1,53	36,72	23,05	30,73	737,52	45,20	0,69
25	2,70	1,80	43,21	34,36	45,81	1099,48	37,41	0,67
28	3,62	2,41	57,89	31,50	41,99	1007,88	8,74	0,21
29	2,30	1,53	36,72	34,36	45,81	1099,48	48,70	0,75
30	3,78	2,52	60,54	32,87	43,82	1051,70	4,60	0,12
31	3,46	2,30	55,29	41,08	54,78	1314,62	35,53	0,82
32	6,68	4,46	106,93	52,49	69,99	1679,79	36,95	1,65
33	8,51	5,67	136,17	63,00	84,00	2016,00	47,85	2,71
34	<b>10,02</b>	<b>6,68</b>	<b>160,33</b>	<b>72,69</b>	<b>96,93</b>	<b>2326,21</b>	<b>67,11</b>	<b>4,48</b>
35	12,71	8,47	203,36	72,69	96,93	2326,21	23,99	2,03
36	11,93	7,95	190,88	70,01	93,35	2240,32	19,18	1,53
37	8,51	5,67	136,17	72,69	96,93	2326,21	40,25	2,28
38	6,67	4,45	106,69	55,59	74,12	1778,82	62,47	2,78





## ANEXO C – Planilha de cálculos ensaio 3

Tempo (d)	CH <sub>4</sub> entrada (l/m <sup>2</sup> /h)	CH <sub>4</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /h)	CH <sub>4</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /d)	O <sub>2</sub> entrada (l/m <sup>2</sup> /h)	O <sub>2</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /h)	O <sub>2</sub> entrada (g/m <sup>2</sup> /d)	Eficiência (%)	Taxa de oxidação (g/m <sup>2</sup> /h)
1	0,93	0,62	14,85	14,54	19,38	465,19	92,34	0,57
2	1,58	1,06	25,35	9,45	12,60	302,29	27,05	0,29
3	2,70	1,80	43,21	10,68	14,24	341,65	20,86	0,38
5	1,58	1,06	25,35	19,68	26,24	629,83	26,60	0,28
7	1,92	1,28	30,71	12,38	16,50	396,12	18,22	0,23
9	2,70	1,80	43,21	18,90	25,20	604,82	8,15	0,15
10	1,81	1,20	28,88	14,00	18,66	447,86	14,38	0,17
11	2,70	1,80	43,21	14,54	19,38	465,19	44,73	0,81
14	0,85	0,57	13,62	19,89	26,52	636,51	66,01	0,37
15	1,81	1,20	28,88	15,12	20,16	483,76	28,81	0,35
16	2,04	1,36	32,66	13,31	17,74	425,83	57,04	0,78
18	2,56	1,71	40,97	17,18	22,91	549,86	49,06	0,84
20	1,19	0,79	18,98	20,11	26,81	643,45	66,91	0,53
21	2,30	1,53	36,72	25,20	33,60	806,35	78,29	1,20
22	3,46	2,30	55,29	25,37	33,82	811,80	11,30	0,26
23	2,04	1,36	32,66	38,81	51,74	1241,83	16,71	0,23
27	3,46	2,30	55,29	15,50	20,67	496,14	4,82	0,11
28	3,78	2,52	60,54	17,18	22,90	549,62	52,77	1,33
30	4,46	2,97	71,33	17,18	22,90	549,62	28,79	0,86
33	5,42	3,61	86,65	10,50	14,00	335,96	41,60	1,50
34	3,62	2,41	57,89	13,50	18,00	432,02	20,92	0,50
36	2,30	1,53	36,72	14,54	19,38	465,19	22,81	0,35
37	2,99	1,99	47,86	23,05	30,73	737,52	30,36	0,61
39	6,68	4,46	106,93	23,98	31,98	767,48	52,28	2,33
40	7,12	4,75	113,92	26,46	35,28	846,72	36,95	1,75
41	4,85	3,23	77,63	29,53	39,37	944,99	22,54	0,73
42	4,46	2,97	71,33	21,89	29,19	700,64	26,37	0,78



## ANEXO D – Conversões

- $\text{CH}_4$ :

Litros  $\rightarrow$  Gramas

Ex: 0,75 litros  $\text{CH}_4$

1 mol - 24 litros

X mol - 0,75 litros

$X = 0,03125 \text{ mol}$

1 mol - 16 g

$0,03125 \text{ mol} - Y$

$Y = 0,5 \text{ g CH}_4$

Litros de  $\text{CH}_4 \cdot (2/3) = \text{gramas de CH}_4$   
ou  
gramas de  $\text{CH}_4 \cdot (3/2) = \text{Litros de CH}_4$

- $\text{O}_2$ :

Litros  $\rightarrow$  Gramas

Ex: 9 litros  $\text{O}_2$

1 mol - 24 litros

X mol - 9 litros

$X = 0,375 \text{ mol}$

1 mol - 32 g

$0,375 \text{ mol} - Y$

$Y = 12 \text{ g CH}_4$

Litros de  $\text{O}_2 \cdot (4/3) = \text{gramas de O}_2$   
ou  
gramas de  $\text{O}_2 \cdot (3/4) = \text{Litros de O}_2$